

УДК 539.1.074.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННОМ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ

© 2013 г. А. Н. Васильев, Ю. М. Гончаренко, А. М. Давиденко, А. А. Деревщиков, В. А. Качанов,  
Ю. М. Мельник, А. П. Мещанин, Н. Г. Минаев, Д. А. Морозов, В. В. Мочалов,  
С. В. Рыжиков, А. В. Рязанцев, П. А. Семенов, А. В. Узунян\*, А. Е. Якутин

ГНЦ РФ “Институт физики высоких энергий”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., ул. Победы, 1

\*E-mail: uzunian@ihep.ru

Поступила в редакцию 28.04.2012 г.

Исследовалось изменение прозрачности кристаллов вольфрамата свинца в процессе непрерывного облучения в течение ~1200 ч в поле  $\gamma$ -излучения радионуклидного источника  $^{60}\text{Co}$ . Температура кристаллов поддерживалась на уровне  $-15^\circ\text{C}$  при мощности дозы излучения 0.1 Гр/ч. После завершения облучения исследован процесс восстановления прозрачности кристаллов при изменении температуры кристаллов от  $-15$  до  $+38^\circ\text{C}$ . Работа проведена в рамках подготовки эксперимента PANDA в проекте FAIR в Германии.

DOI: 10.7868/S0032816213020237

### ВВЕДЕНИЕ

Сцинтиллирующий кристалл вольфрамата свинца ( $\text{PbWO}_4$  или PWO) используется в физике высоких энергий и ядерной физике в качестве преобразователя энергии ионизирующего излучения в световой сигнал. Кристаллы из вольфрамата свинца характеризуются высокой плотностью, малой радиационной длиной, быстрым сигналом и хорошей радиационной стойкостью. Благодаря этим характеристикам он занял лидирующие позиции в электромагнитной калориметрии в физике высоких энергий. Более 100 тысяч таких кристаллов были изготовлены и используются сейчас в экспериментах CMS и ALICE в ЦЕРН [1, 2]. Подавляющее большинство кристаллов PWO выращено на Богородицком заводе химического изделия (БЗХИ, Тульская область). БЗХИ выращивает кристаллы методом Чохральского.

Готовящийся в Европейском центре ионных и антипротонных исследований (проект FAIR, Дармштадт, Германия) эксперимент PANDA планирует использовать в составе установки Центральный электромагнитный калориметр из 16 000 кристаллов PWO. Половина кристаллов, выращенных на БЗХИ по новой технологии, уже есть в наличии. Их радиационная стойкость вдвое выше, чем у кристаллов, которые были изготовлены на том же заводе для экспериментов в ЦЕРН (CMS и ALICE). Группа сотрудников ИФВЭ ранее проводила различные исследования радиационной стойкости кристаллов PWO при комнатной температуре [3–6].

Световой выход кристаллов PWO возрастает практически в три раза при уменьшении температуры от  $+18$  до  $-22^\circ\text{C}$  [7]. Это открывает возможности для их применения не только в экспериментах по физике высоких энергий, но и в экспериментах по физике средних и низких энергий. Эксперимент PANDA планирует установить рабочую температуру кристаллов PWO равной  $-25^\circ\text{C}$  [8]. Охлаждение кристаллов ниже этой температуры оказывается нецелесообразным из-за увеличения времени высвечивания сцинтилляций.

Влияние радиации на изменение оптических свойств данных кристаллов связано как с мощностью дозы облучения, так и с интегральной поглощенной дозой в объеме кристалла в процессе облучения. Согласно данным работы [9], радиация создает в кристаллах так называемые метастабильные “центры цветности”, поглощающие свет в определенной спектральной области. Данные центры с течением времени могут спонтанно переходить в первоначальное состояние (восстанавливаться).

В общем случае кривая зависимости уменьшения прозрачности кристалла от времени в условиях  $\gamma$ -облучения описывается суммой нескольких экспонент, постоянные времени которых являются функциями мощности дозы, температуры кристалла, области спектра и типа центра цветности. В случае, когда скорость образования центров цветности становится равной скорости их восстановления, кривая выходит на плато (не зависит от времени облучения).

Впервые на температурную зависимость радиационной стойкости кристаллов обращено внимание в работе [10]. Более детально исследования влияния температуры кристаллов вольфрамата свинца на их оптические характеристики, используя  $\gamma$ -облучение, проведены в ИФВЭ [7, 11]. Было установлено, что с уменьшением температуры кристаллов процесс спонтанного восстановления индуцированных излучением повреждений замедляется и при температуре  $-25^{\circ}\text{C}$  практически “замораживается”.

В эксперименте PANDA предполагаются непрерывные циклы набора статистики длительностью до шести месяцев. При этом мощности доз в разных частях центрального электромагнитного калориметра ожидаются от 0.001 до 0.03 Гр/ч. Описываемые в данной работе исследования были проведены с целью набора интегральной дозы, близкой к максимально возможной дозе в эксперименте PANDA за шесть месяцев работы на пучке с максимальной светимостью  $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Целью исследований было измерение уровня потемнения кристаллов PWO при непрерывном облучении в течение семи недель в условиях низкой скорости спонтанного восстановления прозрачности для оценки времени эффективной работы кристаллов PWO в установке PANDA. В этом эксперименте предполагается использовать модифицированные кристаллы (PWO-II) с повышенным световыходом при сохранении других свойств [8]. Поскольку нас интересуют только относительные изменения прозрачности кристаллов в условиях воздействия на них радиации, в данной работе использовались имевшиеся в наличии в ИФВЭ кристаллы PWO, изготовленные по технологии БЗХТИ для эксперимента CMS.

Приведены результаты исследований потери прозрачности пяти кристаллов PWO при их непрерывном облучении в течение 1175 ч при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ . Ранее такие продолжительные по времени исследования при непрерывном облучении не проводились.

Кристаллы облучались при мощности дозы 0.1 Гр/ч в поле  $\gamma$ -излучения радионуклидного источника  $^{60}\text{Co}$ , что в три раза больше максимальной ожидаемой мощности дозы в эксперименте PANDA.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В ИФВЭ разработана и создана установка, предназначенная для исследования радиационной стойкости материалов и узлов детекторов в режиме реального времени. В состав установки входят источник  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  активностью  $6.8 \cdot 10^{12}$  Бк; теплоизолированный бокс, изготовленный из непрозрачных материалов, внутрь которого помещается сменная кассета-теплообмен-

ник — в данном варианте для пяти кристаллов PWO и фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.); криотермостат LAUDA; аппаратура мониторинга; регистрирующая электроника и система сбора данных.

С помощью криотермостата устанавливается и поддерживается требуемая температура облучаемых образцов, размещенных в кассете-теплообменнике, в диапазоне от  $+40$  до  $-25^{\circ}\text{C}$  с точностью не хуже  $0.2^{\circ}\text{C}$ . Система мониторинга коэффициента усиления ф.э.у. и прозрачности кристаллов на основе светоизлучающих диодов (голубом — 450 нм и красном — 640 нм), регистрирующая электроника, система сбора данных и программное обеспечение позволяют непрерывно отслеживать изменение изучаемых характеристик облучаемого объекта в процессе облучения. Более подробно аппаратура установки и метод измерения оптических свойств кристаллов описаны в работе [11].

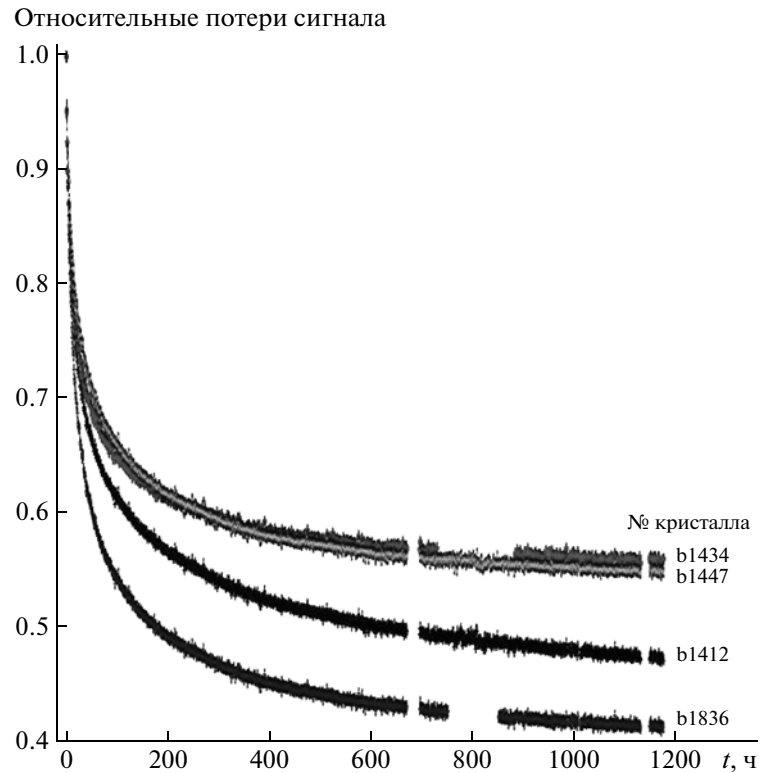
Для измерения светопропускания в диапазоне длин волн 300–800 нм в состав установки добавлен промышленный спектрофотометр AvaSpec-2048 с оптическим разрешением 1 нм [12]. Данный спектрофотометр состоит из излучателя с широким спектром, свет от которого передается к торцу кристалла через кварцевое оптическое волокно, и модуля регистрации спектра с дифракционной решеткой и линейной п.з.с.-матрицей. Свет, прошедший через кристалл, захватывается на его противоположном торце и передается модулю регистрации спектра также с помощью оптического волокна.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

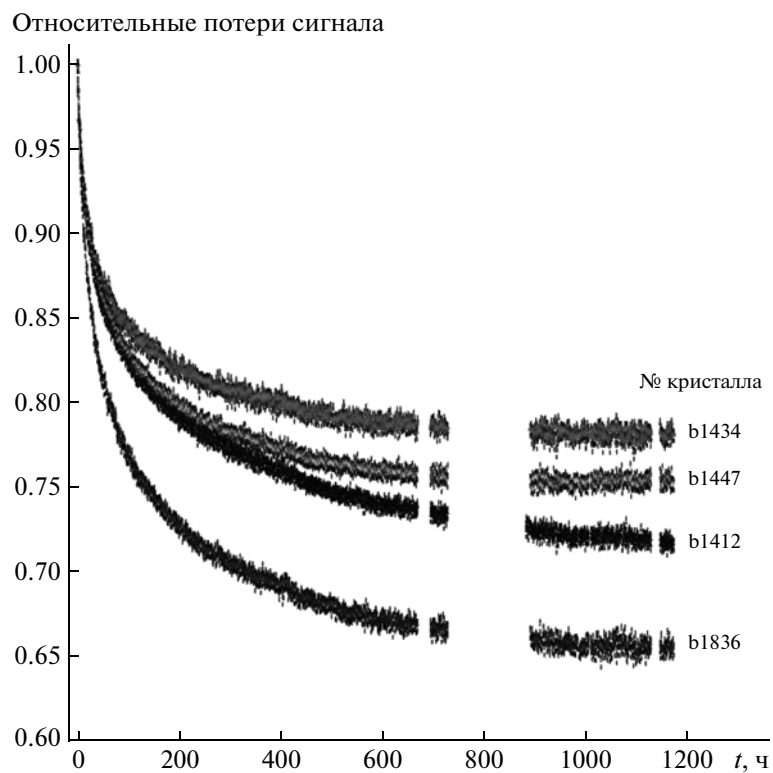
Исследованы четыре кристалла (b1412, b1434, b1447, b1836) длиной 18 см и поперечным сечением  $2 \times 2 \text{ см}^2$  каждый и один кристалл (cms2442) длиной 22 см и поперечным сечением  $2.7 \times 2.7 \text{ см}^2$ . Кристаллы были обернуты светоотражающим материалом Tyvek. Мощность дозы излучения в воздухе на поверхности кристаллов составляла 0.1 Гр/ч с неоднородностью  $<10\%$ . Стабильность температуры кристаллов на уровне  $-15^{\circ}\text{C}$  измерялась с точностью  $0.1^{\circ}\text{C}$ .

Измерения сцинтилляционного сигнала (максимум спектра равен 420 нм) кристалла и светопропускания спектра голубого светодиода для первых четырех образцов проводились “токовым” методом [4].

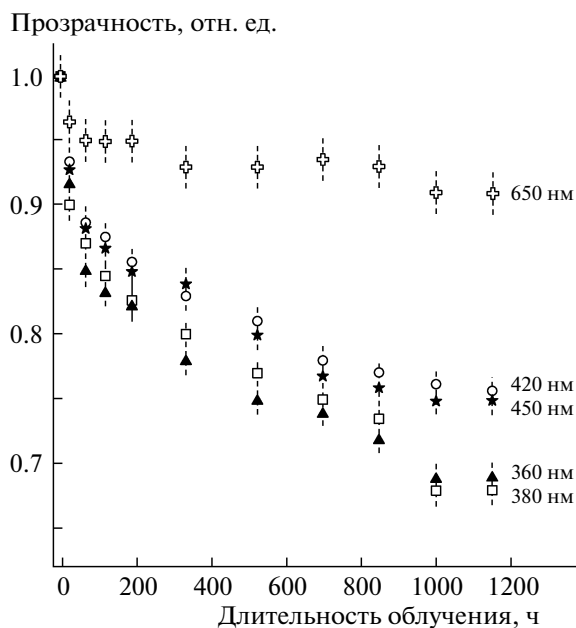
Относительные изменения величин сцинтилляционного сигнала и сигнала от голубого светодиода в зависимости от времени облучения четырех кристаллов приведены на рис. 1 и 2 соответственно. После 1175 ч облучения кристаллы потеряли от 45 до 60% своей первоначальной прозрачности в области спектра сцинтилляции и от 20 до 35% — в



**Рис. 1.** Зависимость сцинтиляционного сигнала от времени в процессе облучения кристаллов мощностью дозы 0.1 Гр/ч при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 2.** Зависимость сигнала голубого светодиода, мониторирующего светопропускание, от времени в процессе облучения кристаллов мощностью дозы 0.1 Гр/ч при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ .



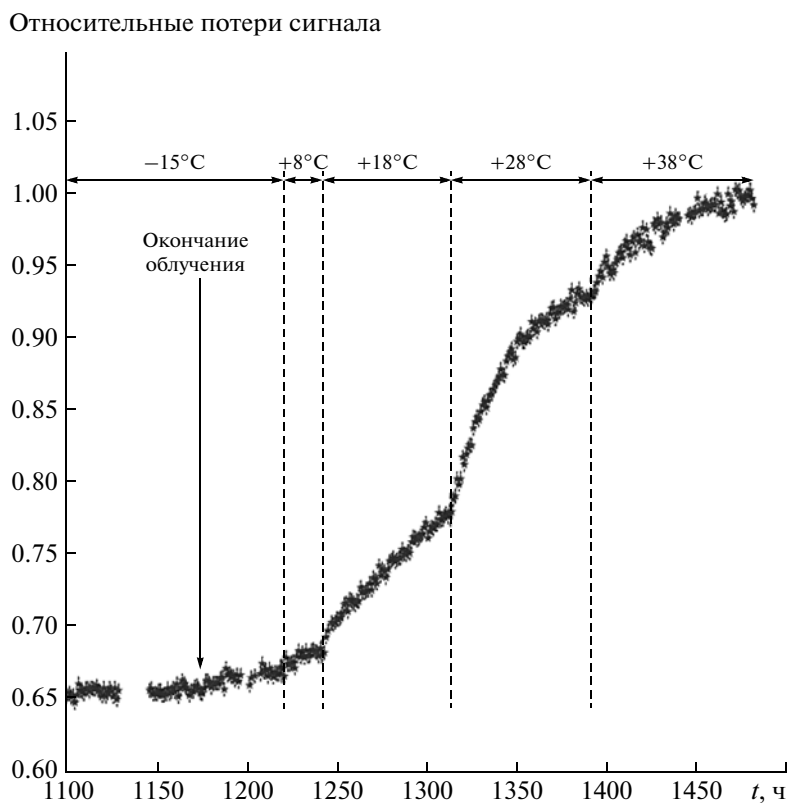
**Рис. 3.** Изменения прозрачности кристалла sms2442 для области длин волн света примерно 360, 380, 420, 450 и 650 нм в зависимости от длительности облучения мощностью дозы 0.1 Гр/ч при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ .

области длин волн спектра голубого светодиода. Сигналы от светодиодов практически вышли на плато. При этом потери сцинтилляционного сигнала по сравнению с первыми часами облучения значительно замедлились и вышли на уровень примерно 0.1% в день.

Уменьшение прозрачности кристалла sms2442 для длин волн 360, 380, 420, 450 и 650 нм в процессе облучения отслеживалось с помощью спектрофотометра и показано на рис. 3. Потеря прозрачности возрастает с уменьшением длины волны. Наибольшая потеря прозрачности (из показанных) происходит при 360 нм, где прозрачность уменьшилась более чем на 30%, тогда как для красного света (650 нм) изменение прозрачности не превысило 10%.

В пределах ошибок измерений (после  $\sim 1000$  ч облучения) можно говорить о выходе на плато кривых ослабления прозрачности в области длин волн 450 нм и выше. Прозрачность кристаллов в диапазоне длин волн, меньших 450 нм, продолжала медленно падать и после 1000 ч непрерывного облучения.

После 1175 ч облучения было остановлено и четыре кристалла (b1412, b1434, b1447 и b1836) подверглись принудительному нагреванию, стимулирующему процесс восстановления прозрач-



**Рис. 4.** Зависимость сигнала голубого светодиода от времени в процессе восстановления прозрачности кристалла b1836 при различных температурах после окончания облучения.

ности. Режим нагревания был следующим: первые 45 ч после окончания облучения температура кристаллов поддерживалась на уровне  $-15^{\circ}\text{C}$ , затем 22 ч на уровне  $+8^{\circ}\text{C}$ , 72 ч на уровне  $+18^{\circ}\text{C}$ , 80 ч на уровне  $+28^{\circ}\text{C}$  и, наконец, 90 ч на уровне  $+38^{\circ}\text{C}$ .

Поведение процесса восстановления прозрачности кристалла b1836 в диапазоне спектра излучения голубого светодиода в зависимости от температуры показано на рис. 4. Восстановление прозрачности при отрицательной температуре происходит очень медленно, скорость восстановления резко возрастает при повышении температуры. Нагревание кристалла до температуры  $+38^{\circ}\text{C}$  позволило добиться восстановления прозрачности кристалла до исходного уровня за достаточно короткое время.

В результате подобной процедуры прозрачность всех четырех кристаллов практически полностью восстановилась.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовалось изменение прозрачности кристаллов вольфрамата свинца в процессе длительного непрерывного облучения в поле  $\gamma$ -излучения радионуклидного источника  $^{60}\text{Co}$ . Температура кристаллов поддерживалась на уровне  $-15^{\circ}\text{C}$ . Мощность дозы излучения составляла 0.1 Гр/ч.

Основной вывод — кристаллы “выжили”, т.е. остались в работоспособном состоянии при непрерывном облучении в течение семи недель.

После облучения кристаллы потеряли от 45 до 60% своей первоначальной прозрачности в области спектра сцинтилляции и от 20 до 35% — в области длин волн спектра голубого светодиода. Сигналы от светодиодов практически вышли на плато. При этом потери сцинтилляционного сигнала по сравнению с первыми часами облучения значительно замедлились и вышли на уровень примерно 0.1% в день.

При нагревании до  $+38^{\circ}\text{C}$  после завершения облучения все кристаллы восстановили свои оптические свойства. Таким образом, можно обойтись и без специальной процедуры восстановле-

ния прозрачности во время измерений в рамках эксперимента PANDA. Во время же длительных остановок в работе детектора PANDA можно осуществлять нагрев кристаллов для восстановления их прозрачности.

Другой вариант восстановления прозрачности (без разогрева детектора) на основе принудительной подсветки кристаллов светодиодами предлагается в работе [13].

Работа финансировалась из средств контрактов с Государственной корпорацией “Росатом”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *The CMS Collaboration, Chatrchyan S. et al.* // J. Instrumentation. 2008. V. 3. P. S08004.
2. *The ALICE Collaboration, Aamodt K. et al.* // J. Instrumentation. V. 3. P. S08002.
3. *Batarin V.A., Brennan T., Butler J. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A512. P. 484.
4. *Batarin V.A., Butler J., Davidenko A.M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A530. P. 286.
5. *Batarin V.A., Butler J., Chen T.Y.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A540. P. 131.
6. *Batarin V.A., Butler J., Davidenko A.M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A550. P. 543.
7. *Semenov P.A., Uzunian A.V., Davidenko A.M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A582. P. 575.
8. *Novotny R.W., Doering W.M., Hjelm F. et al.* // Proc. 2005 IEEE Nuclear Science Symposium. Puerto Rico, 2005. P.
9. *Annenkov A.A., Korzhik M.V., Lecoq P. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A490. P. 30.
10. *Sulc M., Nikl M., Vognar M. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A537. P. 446.
11. *Vasiliev A.N., Goncharenko Yu.M., Davidenko A.M. et al.* // Instrum. and Exp. Tech. 2009. V. 52. № 5. P. 665.
12. <http://www.avantes.ru>
13. *Novotny R.W., Bremer D., Dormenev V. et al.* // XIV International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (CALOR 2010). Beijing, China, 10–4 May 2010; Journal of Physics: Conference Series 293. 2011. 012003.