



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2012–8
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, Д.А. Морозов, В.В. Мочалов, С.В. Рыжиков,
А.В. Рязанцев, П.А. Семенов, А.В. Узунян¹, А.Е. Якутин

**Исследование радиационной стойкости
кристаллов вольфрамата свинца
при их долговременном гамма-облучении**

Направлено в *ИТЭ*

¹Электронный адрес: uzunian@ihep.ru

Протвино 2012

Аннотация

Васильев А.Н. и др. Исследование радиационной стойкости кристаллов вольфрамата свинца при их долговременном гамма-облучении: Препринт ИФВЭ 2012–8. – Протвино, 2012. – 9 с., 4 рис., библиогр.: 13.

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

Abstract

Vasiliev A.N. et al. Investigation of Radiation Hardness of Lead Tungstate Crystals at Long Time of Irradiation: ИФВЭ Preprint 2012–8. – Protvino, 2012. – p. 9, figs. 4, refs.: 13.

The changes of lead tungstate crystal transparency during the process of continuous exposure over about 1.200 hours in the field of gamma radionuclide ^{60}Co source have been investigated. A crystal temperature was maintained at the level of -15°C at a radiation dose rate of 0.1 Gy/h. A recovery process of the crystal transparency in the temperature range from -15 to $+38^{\circ}\text{C}$ was studied just after irradiation. The work was carried out in the framework of the PANDA experiment preparation within the FAIR project in Germany.

Введение

Сцинтиллирующий кристалл вольфрамата свинца ($PbWO_4$ 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 теххимических изделий (БЗТХИ, Тульская область). БЗТХИ выращивает кристаллы методом Чохральского.

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

Световыход кристаллов PWO возрастает практически в три раза при уменьшении температуры от $+18^{\circ}C$ до $-22^{\circ}C$ [7]. Это открывает возможности для его применения не только в экспериментах по физике высоких энергий, но и в экспериментах по физике средних и низких энергий. Эксперимент ПАНДА планирует установить рабочую

температуру кристаллов PWO $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]. Охлаждение кристаллов ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 гамма облучения описывается суммой нескольких экспонент, постоянная времени которых является функцией 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 гамма-облучение, проведены в ИФВЭ [7,11]. Было установлено, что с уменьшением температуры кристаллов процесс спонтанного восстановления индуцированных излучением повреждений замедляется и при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ практически «замораживается».

В эксперименте ПАНДА 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/час. Описываемые в данной работе исследования были проведены с целью набора интегральной дозы, близкой к максимально возможной дозе в эксперименте ПАНДА за шесть месяцев работы на пучке с максимальной светимостью $2 \times 10^{32}\text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

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 ПАНДА. 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 настоящей работе использовались имевшиеся в наличии в ИФВЭ кристаллы PWO, изготовленные по технологии БЗХТИ для эксперимента CMS.

Приведены результаты исследований потери прозрачности пяти кристаллов PWO производства БЗХТИ при их непрерывном облучении в течение 1175 часов при температуре -15°C . Ранее такие продолжительные по времени исследования при непрерывном облучении не проводились.

Кристаллы облучались при мощности дозы 0.1 Гр/час в поле гамма-излучения радионуклидного источника ^{60}Co , что в три раза больше максимальной ожидаемой мощности дозы в эксперименте ПАНДА.

1. Экспериментальная установка

В ГНЦ ИФВЭ разработана и создана установка, предназначенная для исследования радиационной стойкости материалов и узлов детекторов в режиме реального времени. В состав установки входят: источник γ -излучения ^{60}Co активностью $6.8 \cdot 10^{12}$ Бк., теплоизолированный бокс, изготовленный из непрозрачных материалов, внутрь которого помещается сменная кассета-теплообменник – в данном варианте для пяти кристаллов PWO и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), криотермостат LAUDA, аппаратура мониторинга, регистрирующая электроника и система сбора данных.

С помощью криотермостата устанавливается и поддерживается требуемая температура облучаемых образцов, размещённых в кассете-теплообменнике, в диапазоне от $+40^{\circ}\text{C}$ до -25°C с точностью не хуже 0.2°C . Система мониторинга коэффициента усиления ФЭУ и прозрачности кристаллов на основе светоизлучающих диодов (голубой - 450 нм и красный - 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 ПЗС-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 2×2 см² каждый и один кристалл (cms2442) длиной 22 см и поперечным сечением 2.7×2.7 см². Кристаллы были обернуты светоотражающим материалом Тувек. Мощность дозы излучения в воздухе на поверхности кристаллов составляла 0.1 Гр/час с неоднородностью менее 10%. Стабильность температуры кристаллов на уровне -15 °С измерялась с точностью 0.1 °С.

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 часов 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.

Уменьшение прозрачности кристалла cms2442 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%.

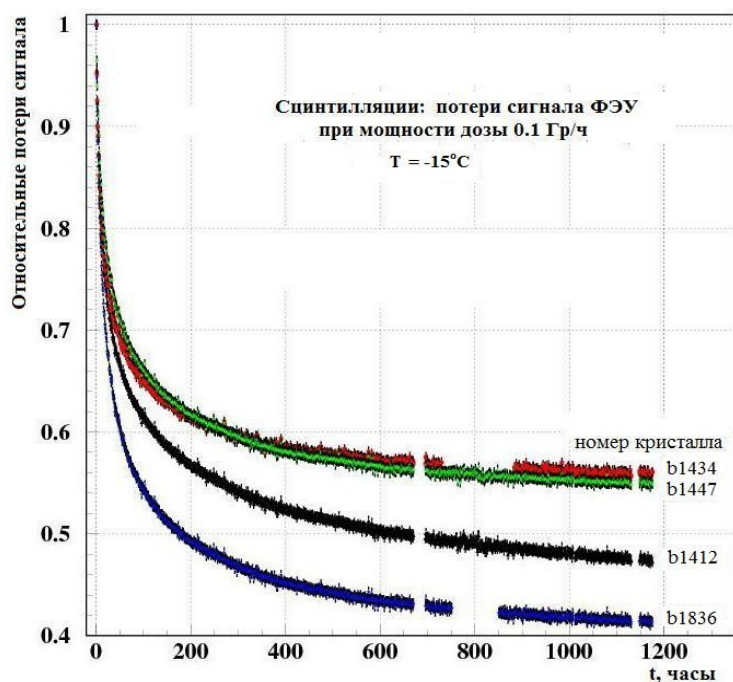


Рис. 1. Зависимость сцинтиляционного сигнала от времени в процессе облучения кристаллов мощностью дозы 0.1 Гр/ч при температуре -15°C.

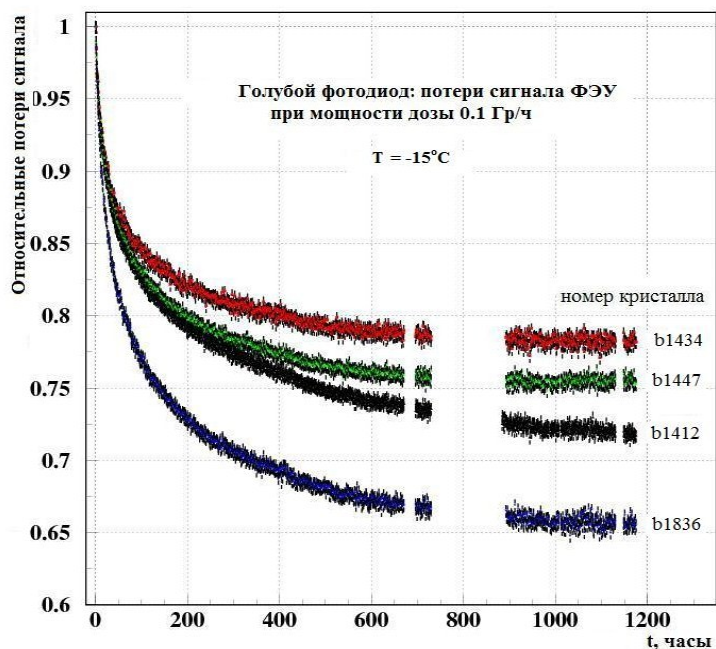


Рис. 2. Зависимость сигнала голубого светодиода, мониторирующего светопропускание, от времени в процессе облучения кристаллов мощностью дозы 0.10 Гр/ч при температуре -15 °C.

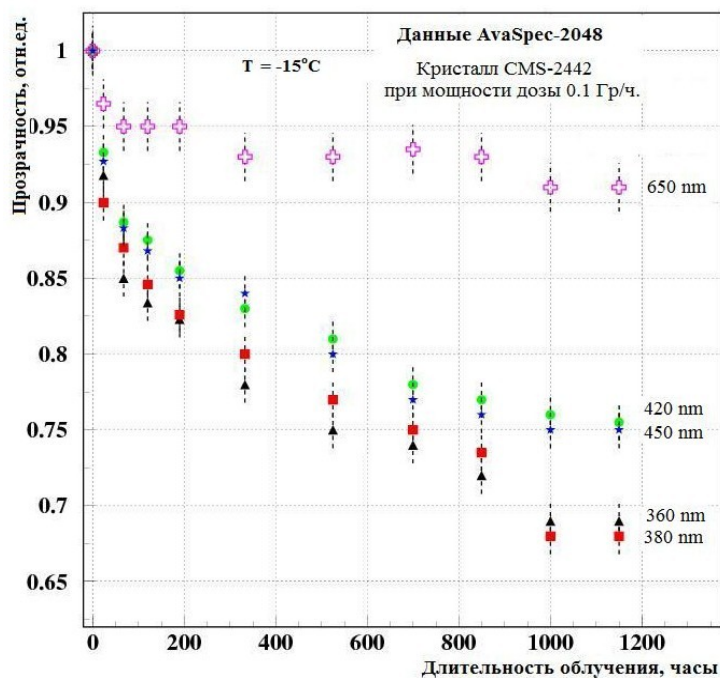


Рис. 3. Изменения прозрачности кристалла sms2442 для области длин волн света примерно 360, 380, 420, 450 и 650 нм в зависимости от длительности облучения мощностью дозы 0.1 Гр/ч при температуре -15°C (получены с использованием спектрофотометра).

В пределах ошибок измерений (после ~ 1000 часов облучения) можно говорить о выходе на плато кривых ослаблений прозрачности в области длин волн 450 нм и выше. Прозрачность кристаллов в диапазоне длин волн меньших 450 нм продолжала медленно падать и после 1000 часов непрерывного облучения.

После 1175 часов облучение было остановлено и четыре кристалла (b1412, b1434, b1447 и b1836) подверглись принудительному нагреванию, стимулирующему процесс восстановления прозрачности. Режим нагревания был следующим: первые 45 часов после окончания облучения температура кристаллов поддерживалась на уровне -15°C , затем 22 часа на уровне $+8^{\circ}\text{C}$, 72 часа на уровне $+18^{\circ}\text{C}$, 80 часов на уровне $+28^{\circ}\text{C}$ и, наконец, 90 часов на уровне $+38^{\circ}\text{C}$.

Поведение процесса восстановления прозрачности кристалла b1836 в диапазоне спектра излучения голубого светодиода в зависимости от температуры приведено 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.

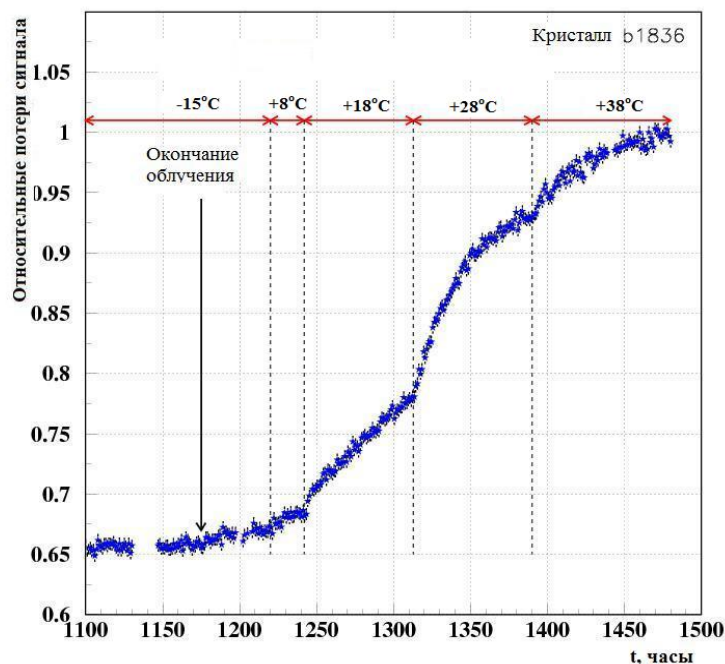


Рис. 4. Зависимость сигнала голубого светодиода от времени в процессе восстановления прозрачности кристалла b1836 при различных температурах после окончания облучения.

Заключение

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

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 синтиллиации 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 °С после завершения облучения все кристаллы восстановили свои оптические свойства. Таким образом, можно обойтись и без специальной процедуры восстановления прозрачности во время измерений в рамках эксперимента ПАНДА. Во время же длительных остановок в работе детектора ПАНДА 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, S Chatrchyan et al. The CMS experiment at the CERN LHC. 2008 JINST 3 S08004.
- [2] The ALICE Collaboration, K Aamodt et al. The ALICE experiment at the CERN LHC. 2008 JINST 3 S08002.
- [3] V.A. Batarin, T. Brennan, J. Butler et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A512. P. 484.
- [4] V.A. Batarin, J. Butler, A.M. Davidenko et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A530. P. 286.
- [5] V.A. Batarin, J. Butler, T.Y. Chen. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A540. P. 131.
- [6] V.A. Batarin, J. Butler, A.M. Davidenko 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. A 582. P. 575.
- [8] Novotny R.W., Doering W.M., Hjelm F. et al. // Proc. 2005 IEEE Nuclear Science Symposium. (Purto Rico, 2005) Conference Record. ISBN: 0-7803-9222-1, N12-4.

- [9] A.A. Annenkov, M.V. Korzhik, P. Lecoq et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A 490. P. 30.
- [10] M. Sulc, M. Nikl, M. Vognar et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A 537. P. 446.
- [11] A. N. Vasiliev, Yu. M. Goncharenko, A. M. Davidenko et al. // Instrum. and Exp. Tech, 2009, Vol. 52, No. 5, pp. 665.
- [12] <http://www.avantes.ru>
- [13] R. W. Novotny, D. Bremer, V. Dormenev et al. // XIV International Conference on Calorimetry in High Energy Physics(CALOR2010), Journal of Physics: Conference Series 293 (2011) 012003.

Рукопись поступила 9 апреля 2012 г.

А.Н. Васильев и др.

Исследование радиационной стойкости кристаллов вольфрамата свинца
при их долговременном гамма-облучении.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 16.04.2012. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 0, 75. Уч.– изд.л. 1,06. Тираж 80. Заказ 39. Индекс 3649.

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2012-8, ИФВЭ, 2012
