

ОСОБЕННОСТИ СЕРТИФИКАЦИИ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

**М. В. Коржик, О. В. Мисевич, А. А. Федоров, Г. Ю. Дробышев,
Р. Ф. Зуевский, В. В. Панов**

На базе ускорителя LHC планируется провести несколько крупных экспериментов. В частности, эксперимент «Компактный мюонный соленоид» (Compact Muon Solenoid, CMS) является одним из самых крупных проектов, готовящихся в настоящее время в ЦЕРНе [1, 2, 3]. Разработка эксперимента CMS началась в 1990 г. Основной идеей коллаборации было создание наилучшего возможного электромагнитного калориметра (Electromagnetic CALorimeter, ECAL), совмещенного с мюонной системой.

Электромагнитный калориметр будет состоять из сцинтилляционных кристаллов PWO с лавинными фотодиодами (ЛФД, Avalanche Photo Diode, APD) в качестве фотодетекторов. Общий объем кристаллов центральной части калориметра $8,14 \text{ м}^3$, объем торцевой части $1,52 \text{ м}^3$. Создание такого детектора является беспрецедентным. Ни одна физическая установка в мире еще не содержала столь большого количества кристаллических детекторов, удовлетворяющим весьма жестким требованиям, предъявляемым к их свойствам и дисперсии этих свойств.

По сравнению с другими используемыми сцинтилляторами и черенковскими радиаторами кристалл PWO имеет самую высокую плотность, наименьшие радиационную длину L_R и радиус Мольера R_M , что позволяет создать компактный электромагнитный калориметр. Участниками коллаборации CMS было принято решение об использовании кристаллов PWO при построении электромагнитного калориметра.

1. Особенности сертификации сцинтилляторов PWO для проекта CMS. Производство сцинтилляторов вольфрамата свинца для ECAL CMS – это конвейерное производство, которое будет работать с максимальной производительностью в течение нескольких лет, чтобы изготовить более 80 000 кристаллов PWO без складирования выпускаемой продукции. Это означает, что сбой при производстве кристаллов может негативно сказаться на работе всей коллаборации. Следовательно, производство и поставка кристаллов должны сопровождаться хорошо продуманной системой мероприятий, обеспечивающей эффективное производство сцинтилляционных кристаллов с заданными свойствами и минимальным количеством рекламаций.

Полученные в ходе исследований данные о физических свойствах сцинтилляционных кристаллов вольфрамата свинца позволяют сформировать спецификацию на параметры кристаллов и выстроить последовательность необходимых измерений, проводимых перед производством кристаллов и во время производства, их поставки и эксплуатации.

Все необходимые измерения могут быть разделены на две группы: сертификационные и контрольные измерения.

Сертификационные измерения – набор измерений, позволяющих заказчику осуществлять приемку изделий. Этот набор включает спецификацию на механические, оптические и сцинтилляционные параметры (спектр излучения, оптическое пропускание на различных длинах волн, измеренное вдоль и перпендикулярно оси кристалла, световыход, кинетика сцинтилляций и неоднородность световыхода).

Контрольные измерения – набор измерений, позволяющий производителю контролировать воспроизводимость свойств кристаллов вольфрамата свинца в течение всего периода производства. По существу, контрольные измерения должны обеспечить получение достоверной информации для понимания эволюции технологии производства.

Спецификация на параметры сцинтилляционных кристаллов PWO проекта CMS. В рамках работ по созданию прецизионного электромагнитного калориметра проекта CMS наиболее важные параметры кристаллов PWO определены следующим образом.

Спектры оптического пропускания. *Пропускание перпендикулярно оси кристалла* – измеряется в направлении перпендикулярно оси кристалла в 10–20 точках вдоль сцинтилляционного элемента в диапазоне длин волн 300–700 нм с абсолютной погрешностью $\pm 0,5$ %. Эти данные требуются для проверки неоднородности пропускания, вызванной отклонениями в качестве сырья и технологии, позволяют делать заключение о радиационной стойкости кристаллов.

Пропускание вдоль оси кристалла – измеряется для определения длины поглощения света сцинтилляций и используется для униформизации сбора света из сцинтилляционных элементов.

При этом абсолютные значения пропускания должны быть: $T \geq 10$ % (360 нм); $T \geq 55$ % (420 нм); $T \geq 65$ % (600 нм).

Крутизна края спектра пропускания в диапазоне длин волн от 340–380 нм должна быть $S > 1,5$ %/мм. Выполнение данного условия служит дополнительным критерием радиационной стойкости кристаллов.

Световыход, неоднородность световыхода и время высвечивания сцинтилляций. *Световыход* – в более чем 10 точках должен измеряться вдоль кристалла с последующей оценкой неоднородности световыхода.

Величина светосбора должна превышать 10 фотоэлектронов/МэВ при измерении на ФЭУ XR2262, когда вся задняя поверхность кристалла находится в оптическом контакте с фотокатодом (окно 24×24 мм²) и используется оптическая смазка с коэффициентом преломления $n = 1,5$ типа Rhodorsil, при времени интегрирования 100 нс, температуре 18 °С и источнике излучения, расположенном в 80 мм от выходной поверхности кристалла.

Неоднородность световыхода – относительное изменение световыхода по длине сцинтилляционного элемента. Этот параметр имеет значительное влияние на точность определения энергии частиц, регистрируемых с помощью сцинтилляционных детекторов, работающих в режиме полного поглощения. Он выражается в процентах на единицу радиационной длины.

Неоднородность световыхода не должна превышать $0,35\%/X_0$, она обычно измеряется для двух диапазонов: от 35 до 115 мм и от 115 до 185 мм от передней поверхности кристалла.

Кинетика сцинтилляции. Параметры кинетики сцинтилляции могут быть выражены как постоянные времена высвечивания компонент сцинтилляции и их амплитуды или как число фотонов сцинтилляции, испускаемых в заданные промежутки времени.

Кинетика сцинтилляций должна удовлетворять критерию: отношение световыходов измеренных при временах интегрирования сигналов 100 и 1000 нс превышает 90 %. Послесвечение должно быть менее или равно 0,5 % от амплитуды пика при облучении γ -квантами от источника Co^{60} при скорости счета 1 МГц.

Радиационная стойкость. Приняты следующие требования к радиационной стойкости: индуцированное поглощение в кристалле при наступлении насыщения $\mu \leq 0,5 \text{ м}^{-1}$ при длине волны 420 нм, при условии бокового облучения от источника Co^{60} при мощности поглощенной дозы более 10 крад/ч и поглощенной дозе более 50 крад; потери световыхода менее 6 % при фронтальном облучении от источника Co^{60} при мощности поглощенной дозы более 15 рад/ч и поглощенной дозе более 200 рад; отсутствие постоянных времени восстановления менее одного часа.

Методы и средства сертификационных измерений сцинтилляционных параметров кристаллов PWO. Измерение оптического пропускания. Типичный спектр пропускания кристалла PWO состоит из плато в области 500–700 нм и плавно уменьшающейся кривой пропускания в области ниже 500 нм. То есть спектр пропускания PWO не имеет узких полос поглощения, так что нет необходимости производить измерения оптического пропускания с высоким спектральным разрешением. Спектр пропускания может быть измерен для нескольких выбранных длин волн, что позволяет значительно сократить время измерений. Поэтому измерения производятся на 11 длинах волн: 330, 340, 350, 360, 380, 405, 420, 450, 492, 620, 700 нм.

Методы измерения световыхода, неоднородности световыхода и кинетики сцинтилляций. Измерения световыхода (LY) и неоднородности световыхода (LYN) могут производиться, например, по положению пика полного поглощения в амплитудном спектре изотопа ^{60}Co , достаточно разрешенного от комптоновских сигналов и шума ФЭУ.

Из-за относительно малого световыхода PWO (5–20 ph.e / МэВ, т. е. 6–25 фотоэлектронов в пике полного поглощения γ -квантов со средней энергией 1,25 МэВ, источник ^{60}Co) необходимо использовать отражающее покрытие кристалла и иммерсионную среду между кристаллом и ФЭУ. Эти требования значительно уменьшают гибкость и быстродействие измерений и вносят дополнительную систематическую погрешность. Данный метод приемлем для поточных исследований с загрузкой 2–3 кристалла в час.

В системе ACCOS реализован метод счета фотонов, который совмещен с измерением кинетики сцинтилляций «старт-стоп» методом при возбуждении источником аннигиляционных γ -квантов ^{22}Na .

Методы исследования радиационной стойкости кристаллов. Проведение измерений радиационной стойкости всех поставляемых кристаллов не представляется возможным. Для оценки этого свойства предлагается использовать корреляцию между величиной радиационной стойкости кристаллов и величиной наклона края спектра пропускания, измеренного вдоль оси в диапазоне длин волн от 340 до 380 нм. Вместе с тем целесообразным представляется проводить дополнительные измерения радиационной стойкости части сцинтилляционных кристаллов по следующей схеме:

а) измерение индуцированного поглощения в верхних частях кристаллов для первых и последних кристаллизаций из приемлемых при смене сырья;

б) выборочная проверка полноразмерных кристаллов в случае, если одно из измерений по пункту а) дало значение индуцированного поглощения на специфицированной длине волны, близкое к верхнему пределу допустимых спецификацией значений.

Система для контроля радиационной стойкости кристаллов должна удовлетворять следующим требованиям:

- она должна быть пригодна для тестирования полноразмерных кристаллов (длиной 230 мм) и специально подготовленных образцов;
- изменение оптического пропускания должно измеряться на специфицированных длинах волн и в течение короткого цикла;
- вследствие зависимости радиационно-индуцированного поражения оптического пропускания от интенсивности облучения измерения должны выполняться в реальных условиях, т. е. при интенсивностях облучения от 15 до 100 рад/ч, соответствующих условиям реальных экспериментов, планируемых в рамках проекта CMS. Данное требование приводит к необходимости создания системы, пригодной для длительной непрерывной работы (несколько дней) в автоматическом режиме;
- система должна обеспечивать тестирование нескольких кристаллов одновременно.

Для мониторинга радиационной стойкости и постоянной времени восстановления кристаллов PWO спектротрическая система RGB была разработана и установлена на заводе. Данная система представляет собой аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий оперативное автоматическое измерение величины падения оптического пропускания кристаллов PWO под действием ионизирующего облучения с последующим автоматическим вычислением наведенного излучением поглощения Δk .

Конструктивно система состоит из измерительного блока с кассетой и компьютера с установленным программным обеспечением «RGB data acquisition». Кассета предназначена для фиксации в ней 4 кристаллов PWO. В измерительном блоке находятся система источников света трех цветов (красный, зеленый, синий), фотодетекторы и управляющая электроника.

Действие спектрометра основано на измерении изменения оптического пропускания вдоль оси кристалла PWO после облучения на трех длинах волн. Система оборудована радиоактивным источником ^{60}Co , имеющим круговую геометрию и установленным в колодце с радиационной защитой. Цилиндрический контейнер с четырьмя кристаллами PWO, помещенный в шахту, облучается в поперечном направлении со всех сторон при мощности дозы порядка 10 крад/ч в течение 10 мин. Процедура измерения включает: предварительное измерение оптического пропускания, извлечение контейнера из спектрометра и помещение его в шахту, облучение, повторную установку контейнера в спектрометр и измерение поражения и восстановления оптического пропускания кристаллов. После чего программное обеспечение производит расчет индуцированного поглощения кристаллов.

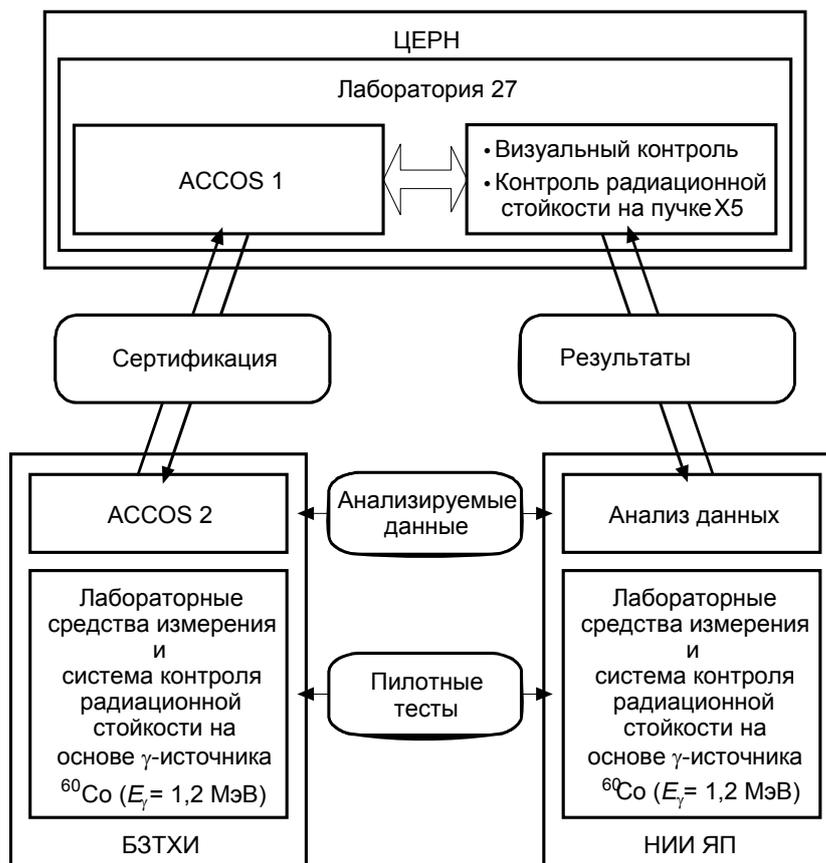


Рис. 1. Схема обеспечения контроля параметров кристаллов PWO

Алгоритм отбора сцинтилляционных кристаллов для использования в электромагнитной калориметрии при их массовом производстве. Все необходимые измерения, как сертификационные, так и контрольные, могут быть выполнены в рамках схемы контроля, приведенной на рис. 1. Она предусматривает участие не только производителя, но и потребителя кристаллов. С другой сторо-

ны, такое взаимодействие в процессе массового производства позволяет формализовать уровни принятия решений, иерархия которых представлена на рис. 2.

Как видно из данных схем, на первом уровне непосредственно на Богородицком заводе технохимических изделий (БЗТХИ) с помощью лабораторных средств измерения и системы контроля радиационной стойкости кристаллов на



Рис. 2. Иерархия уровней принятия решений при контроле параметров кристаллов PWO

основе источника ^{60}Co проводятся исследования пилотных партий кристаллов, а также выборочный контроль сырья методом GDMS. Затем в НИИ ядерных проблем как независимой экспертной организации, обладающей необходимым аналитическим оборудованием и квалифицированными специалистами, проводится анализ и выборочная верификация полученных данных. В случае получения положительных результатов, данная партия сырья принимается к производству кристаллов.

На втором уровне кристаллы произведенной партии проходят на заводе сертификацию на системе ACCOS, а также выборочный контроль радиационной стойкости кристаллов. Результаты сертификации анализируются в НИИ ЯП и передаются на завод, на основе чего по каждому кристаллу принимается решение о возможности его поставки в ЦЕРН. При этом НИИ ЯП передает в ЦЕРН результаты анализа кристаллов.

На третьем уровне в Лаборатории 27 в ЦЕРНе проводится регистрация и визуальный контроль поступивших кристаллов. Затем с помощью системы ACCOS осуществляется сертификация кристаллов, а также выборочное тестирование кристаллов на пучке частиц на комплексе X5. После чего кристаллы сортируются в соответствии со своими параметрами. Полученные результаты анализируются в Лаборатории 27 и НИИ ЯП. По результатам анализа ЦЕРН принимает по каждому кристаллу решение о его годности для монтажа в модулях детектора.

Таким образом, предложенная схема взаимодействия сторон и своевременный обмен данными должны обеспечить успешное производство кристаллов в заданные сроки.

2. ACCOS – Автоматическая система контроля качества кристаллов.

Система контроля качества кристаллов, пригодная для применения в условиях массового производства, должна быть максимально автоматизирована в целях уменьшения влияния субъективного фактора и иметь пропускную способность не менее 40 кристаллов в день.

Для массового производства в НИИ ЯП (Минск, Беларусь) совместно с Лабораторией физики частиц в Анси (ЛАПП, Анси-ле-Вье, Франция) и ЦЕРН (Женева, Швейцария) была разработана Автоматическая система контроля кристаллов (Automatic Crystal Control System – ACCOS) [4, 5].

Так как кристаллы PWO подвержены механическим повреждениям, необходимо минимизировать количество манипуляций с ними. Приемлемым решением оказалась установка кристаллов на специальные штативы, расположенные на вращающейся платформе. Кристаллы остаются неподвижными относительно платформы в течение всего цикла измерений, а спектрометры перемещаются вдоль измеряемого кристалла. Данное решение потребовало разработки соответствующих компактных спектрометров. Созданные приспособления также обеспечивают точное позиционирование кристаллов относительно измерительных приборов.

Система построена с на основе стандартных и специализированных модулей в стандарте VME, управляющих компьютеров типа IBM PC с операционной системой Microsoft Windows NT. Программное обеспечение реализовано с ис-

пользованием языков C++ и среды LabVIEW. Вся система установлена в термо-стабилизированном и светоизолированном боксе.

На рис. 3, *a* приведен вид типичной кинетики сцинтилляций кристалла PWO, а на рис. 3, *б* – ее интеграл, рассчитанный с помощью аналитического программного обеспечения системы ACCOS.

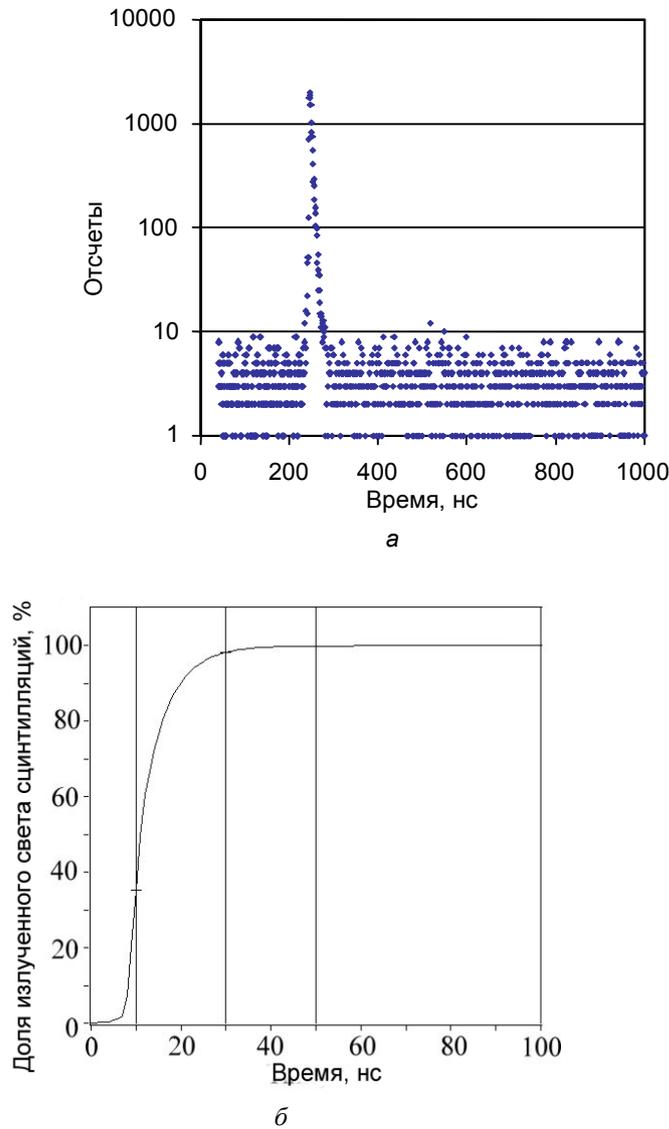


Рис. 3. Типичная кинетика сцинтилляций кристалла PWO (*a*) и ее интеграл (*б*)

Спектрометр для измерения пропускания содержит источник света на базе галогеновой лампы мощностью 20 Вт и четырехлинзового коллиматора; три объектива; вращающийся диск с 11 интерференционными фильтрами; модулятор; детектор на базе фотодиода Hamamatsu S6337 площадью $20 \times 20 \text{ мм}^2$ с рас-

ширенной в УФ-область чувствительностью и электронные блоки усиления сигнала и синхронизации чтения АЦП. Размеры спектрометра $70 \times 80 \times 220 \text{ мм}^3$. Столь компактная конструкция позволяет производить быстрые перемещения спектрометра между положениями измерения и калибровки.

При работе диск с интерференционными фильтрами вращается, обеспечивая поочередную установку фильтров в пучке света, и, таким образом, измерение сигнала на определенной длине волны. Время измерения на одной длине волны – порядка 0,5 с. Весь цикл измерения занимает 5,5 с.

На рис. 4 приведены типичные спектры оптического пропускания кристалла PWO, измеренные вдоль (а) и перпендикулярно (б) оси кристалла. Показаны разброс величин длин волн $\Delta\lambda$ спектров пропускания, измеренных перпендикулярно оси кристалла, и наклон края спектра пропускания в диапазоне длин волн от 340 до 380 нм, измеренного вдоль оси.

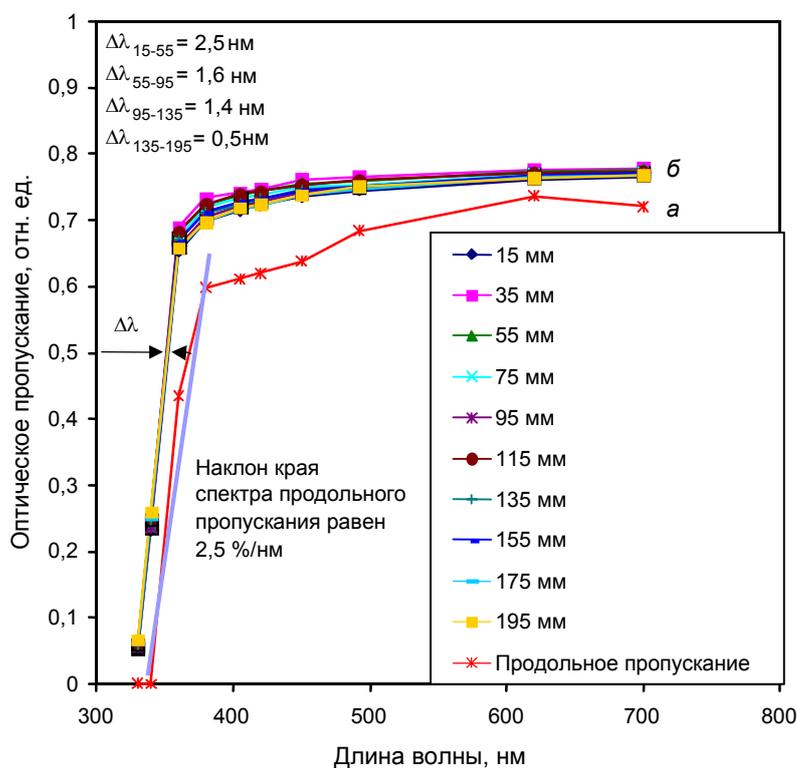


Рис. 4. Типичные спектры оптического пропускания кристалла PWO, измеренные вдоль (а) и перпендикулярно (б) оси кристалла

Программное обеспечение низкого уровня включает специальные драйверы устройств и динамические проблемно-ориентированные библиотеки, предназначенные для обеспечения связи и обмена данными между драйверами устройств

и приложениями высокого уровня. Программное обеспечение высокого уровня предоставляет пользовательский интерфейс для сбора, анализа и обработки данных, а также их сохранения и представления. Также имеется поддержка коммуникации с базой данных C.R.I.S.T.A.L., которая может генерировать список задач для измерительной системы и сохранять результаты измерений. Программное обеспечение высокого уровня разрабатывалось с помощью графической системы программирования LabVIEW.

3. Анализ параметров сцинтилляционных элементов PWO, полученных в условиях массового производства. Первые полномасштабные тесты кристаллов PWO на системе ACCOS были проведены в целях отладки процедуры рутинной сертификации параметров кристаллов и испытания самой системы. Для этих тестов были использованы кристаллы PWO, изготовленные в рамках подготовки массового производства кристаллов PWO на Богородицком заводе химических изделий.

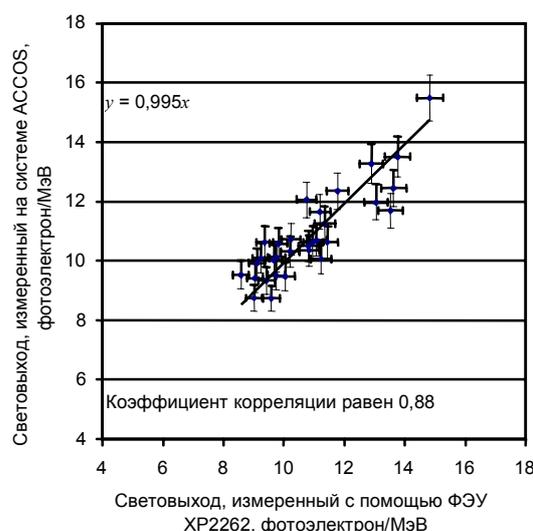


Рис. 5. Корреляция между результатами измерений световыхода кристаллов, полученных с помощью системы ACCOS и системы амплитудного анализа на основе ФЭУ XP2262

В ходе данных тестов особое внимание было уделено сравнению результатов измерений параметров кристаллов, полученных с помощью системы ACCOS и обычных лабораторных методов исследований.

На рис. 5 приведена корреляция между результатами измерений световыходов кристаллов, полученных с помощью системы ACCOS и системы амплитудного анализа на основе ФЭУ XP2262. Приведен результат аппроксимации линейной функцией.

На рис. 6 представлена корреляция между результатами измерений неоднородности световыхода для двух диапазонов 35–115 мм (а) и 115–185 мм (б) от передней грани кристалла, полученными с помощью системы ACCOS и системы

амплитудного анализа на основе ФЭУ ХР2262. Приведены результаты аппроксимации линейной функцией.

Как видно, обнаружено хорошее согласие между результатами, полученными с помощью системы ACCOS и обычными лабораторными методами исследований.

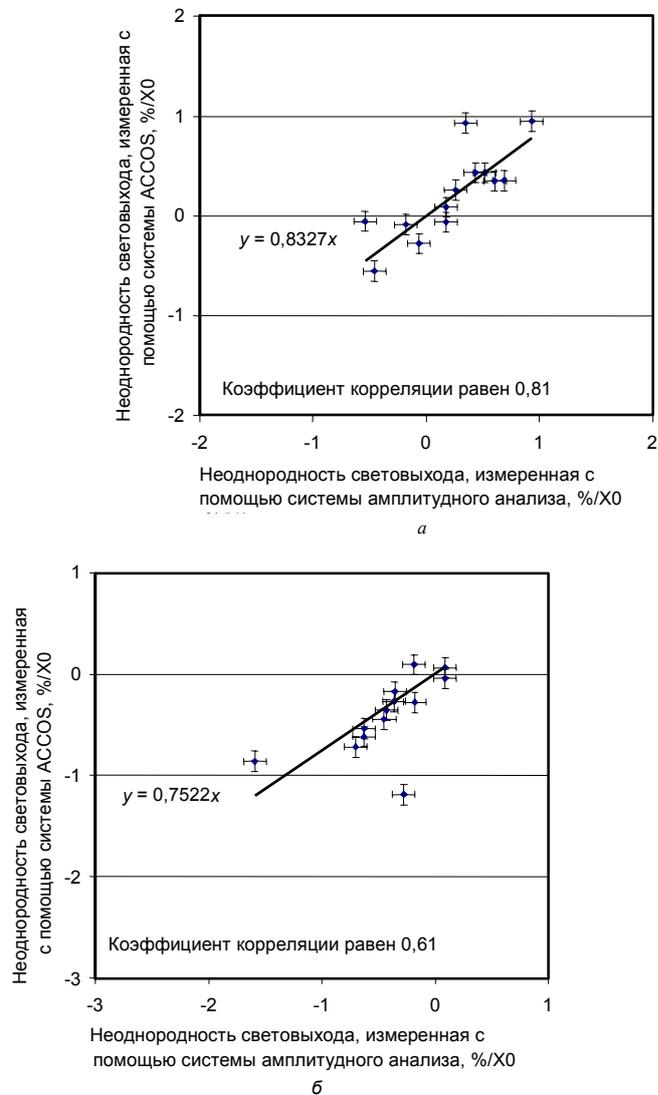


Рис. 6. Корреляция между результатами измерений неоднородности световыхода для двух диапазонов 35–115 мм (а) и 115–185 мм (б) от передней грани кристалла, полученными с помощью системы ACCOS и системы амплитудного анализа на основе ФЭУ ХР2262

Таким образом, установлено, что предложенный подход к сертификации кристаллов PWO и аппаратура для его реализации в виде системы ACCOS позволяют проводить надежную сертификацию сцинтилляторов для комплектации детектора ECAL CMS.

Литература

1. The Compact Muon Solenoid. Technical proposal CERN/LHCC 94-38. 15 Dec. 1994. P. 290.
2. Faure J. L., Ille B., Lebeau M. et al. // CMS TN. 1992. № 043. P. 23.
3. Barney. D. // CMS CR. 1998. № 004. P. 36.
4. Auffray E., Drobychev G., Korzhik M. et al. // IEEE'98. Abstr. Toronto, Canada, Nov. 8-14, 1998. № 20-31. P. 6.
5. Drobychev G. , Korzhik M., Peigneux J. P. et al. // CMS TN. 1997. № 036. P. 38.

CERTIFICATION PECULIARITY OF LEAD TUNGSTATE CRYSTALS SCINTILLATION PARAMETERS AT MASS PRODUCTION CONDITIONS

**M. V. Korzhik, O. V. Missevitch, A. A. Fedorov, G. Yu. Drobychev,
R. F. Zuyuski, V. V. Panov**

The building up of the large scale detectors for high-energy physics experiments in coming millenium such as CMS electromagnetic calorimeter requires the production of tens of thousands of scintillating crystal. The high-performance target of such detectors impose strict requirements on parameters of crystals, such as sufficient light yield, acceptable light yield uniformity, short decay time free of slow components, and very limited light yield loss under irradiation, precise dimensions. The challenge is to provide a high production rate and appropriate quality control for such a large scale project. The certifying procedure approach developed for the production centers and CERN is presented here. Multilevel quality control scheme is proposed. The equipment built for the automatic measurement of the optical and scintillation properties and the associated software tools as well as the method and tools for the radiation hardness tests are presented.