ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА PANDA (GSI, ГЕРМАНИЯ)

В. И. Дорменев, Г. Ю. Дробышев, М. В. Коржик, О. В. Мисевич

1. Введение

Проведение современных экспериментов по физике высоких энергий требует создания нового типа ускорительных комплексов. При этом увеличение интенсивности пучка и энергии ускоряемых частиц требует разработки нового поколения детекторных установок, которые должны обеспечивать высокую скорость счета, регистрируемых событий, широкий диапазон энергии регистрации вторичных частиц и быть радиационно-стойкими к ионизирующему излучению. Важной составной частью современных детекторных установок является электромагнитный калориметр (ЭМК) на основе неорганических сцинтилляционных кристаллов.

Одним из широко применяемых сцинтилляционных материалов в экспериментальной физике частиц является кристалл вольфрамата свинца, $PbWO_4$ (PWO) [1]. Данный материал был выбран в качестве сцинтиллятора для электромагнитного калориметра при разработке таких экспериментальных установок, как PRIMEX в JLAB [2], CMS-ECAL и ALICE-PHOS на ускорителе LHC (ЦЕРН) [3] и PANDA на ускорителе FAIR (GSI, Германия).

В данной работе представлены результаты исследований по оптимизации свойств кристаллов вольфрамата свинца для применения в ЭМК эксперимента PANDA.

2. Эксперимент PANDA

Эксперимент PANDA будет проводиться на базе высокоэнергетического накопительного кольца HESR (High Energy Storage Ring). С помощью ускорителя HESR будет возможно формирование пучка антипротонов интенсивностью вплоть до 10^{11} $с^{-1}$ и с энергией в диапазоне 1.5–15 ГэВ [4, 5].

Экспериментальная программа проекта PANDA охватывает следующие направления [6, 7]:

1. Спектроскопия чармония (cc): измерение энергии и ширины уровня всех состояний чармония с высокой точностью. Следует отметить, что важным преимуществом экспериментов с реакциями pp, в отличие от e^-e^+ реакций, является возможность получения мезонов со всеми разрешенными квантово-механическими состояниями по спину заряду и четности. Примерами реакций, которые необходимо будет регистрировать в этом случае, являются $pp \to \eta_c \to \gamma\gamma$, $pp \to J/\psi \to e^+e^-$.

2. Исследование свойств экзотических адронов (гибриды, глюболы, содержащие c– и $\bar{c}$–кварки) в области масс чармония (3–5 ГэВ), предсказанных в рамках квантовой хромодинамики. Примеры реакций: $pp \to h_c\eta \to \chi_c\pi^0\pi^0\eta$, $pp \to DD \to KK\pi KK\pi$.

3. Исследование структуры одиночных и двойных гиперядер, гиперон-нуклонного и гиперон-гиперон взаимодействия с помощью точной γ-спектроскопии в реакциях типа $pp \rightarrow \Lambda\Lambda$ и $pp \rightarrow \Xi\Xi$.

Регистрация многих реакций будет проводиться по электромагнитному каналу распада, с регистрацией γ-квантов, электронов и позитронов. При этом энергия регистрируемых частиц будет находиться в диапазоне от 10 МэВ до 10 ГэВ. Оптимальным решением данной задачи является применение гомогенного ЭМК на основе кристаллов PWO.

3. Увеличение выхода сцинтилляции кристаллов вольфрамата свинца

В последние 15 лет в НИИ ЯП БГУ был разработан сцинтилляционный кристалл вольфрамата свинца, который выбран в качестве рабочего материала для ЭМК эксперимента CMS.

Кристаллы PWO, оптимизированные для применения в ЭМК эксперимента CMS, имеют быструю кинетику сцинтилляций, высокие плотность и радиационную стойкость. Для обеспечения высокой радиационной стойкости кристаллы данного типа активируются ионами La и Y на уровне 100 ppm.

Главным недостатком этих кристаллов с точки зрения применения в ЭМК эксперимента PANDA является относительно низкий выход сцинтилляции (8–12 фэ/МэВ при использовании ФЭУ XP 2020Q), что очень критично для энерге-тического разрешения ЭМК при регистрации γ-квантов низких энергий, вплоть до нескольких десятков МэВ.

Авторами [8, 9] было выдвинуто предположение, что дальнейшее увеличение световыхода сцинтилляции PWO возможно получить двумя методами. Во-первых, уменьшением концентрации точечных дефектов в структуре кристаллов, во-вторых, активацией кристалла люминесцентными примесными центрами, которые имеют большое сечение электронного захвата из зоны проводимости и относительно короткое время последующей излучательной рекомбинации. В результате дальнейших исследований по оптимизации свойств кристаллов PWO были получены образцы с повышенным световыходом – так называемый кристалл PWO-II. Кристалл PWO-II длиной 20 см имеет световыход 17–22 фэ/МэВ при проведении измерений на ФЭУ XP 2020Q при комнатной температуре. Уровень активации кристаллов PWO-II ионами La и Y равен 40 ppm.

Таким образом, было получено двукратное увеличение световыхода для полноразмерных образцов кристаллов PWO-II по сравнению с образцами для проекта CMS. Это достигнуто путем повышения структурного совершенства кристаллов и уменьшения концентрации используемых активаторов. При этом радиационно-наведенное оптическое поглощение и кинетика высвечивания сцинтилляции сохранились на ранее достигнутом уровне.

4. Температурная зависимость световыхода кристаллов PWO-II

В дополнение к увеличению выхода сцинтилляций за счет совершенствования технологии, дальнейшее увеличение выхода достигается при охлаждении кристалла. Это объясняется тем, что при охлаждении кристалла температурное тушение сцинтилляции становится менее интенсивным, что приводит к увеличению

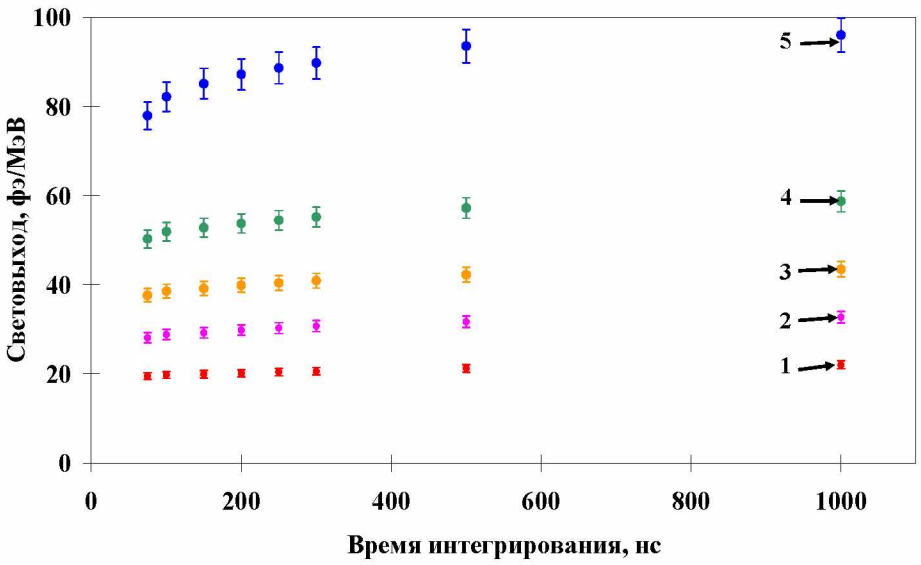

Рис. 1. Зависимости среднего значения световыхода от времени интегрирования для 10 кристаллов PWO-II при различных температурах: 1 – измерение при T = +25 °C; 2 – измерение при T = +10 °C; 3 – измерение при T = 0 °C; 4 – измерение при T = –10 °C; 5 – измерение при T = –25 °C

световыхода. Однако в неактивированных кристаллах понижение температуры приводит к существенному замедлению кинетики люминесценции, а следовательно, и сцинтилляции, за счет возрастания интенсивности медленных компонент [10].

Установлено, что в активированных кристаллах, выращенных по оптимизированной технологии, при понижении температуры не происходит столь быстрого перераспределения кинетики сцинтилляций в сторону медленных компонент. На рис. 1 представлены результаты измерения световыхода кристалла PWO-II при различных температурах и временах интегрирования. Видно, что величина световыхода при понижении температуры с –25 ° до +25 °C возрастает в среднем в 4 раза при значении времени интегрирования 75 нс и в 4.5 раза – при 1000 нс. Это объясняется тем, что при охлаждении образца температурное тушение сцинтилляции становится менее интенсивным, это приводит к увеличению световыхода за счет возрастания интенсивности медленных компонент в сцинтилляции. Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что при температуре –25 °C не менее 90 % запасенной светосуммы высвечивается в среднем за 200 нс.

5. Свойства матрицы 3×3 кристаллов 3×3 PWO-II с ЛФД в качестве фотодетектора при облучении на пучках γ-квантов

Важным этапом при создании ЭМК является проведение тестовых исследований матриц, состоящих из нескольких детекторных модулей, на пучках частиц с целью оценки основных характеристик калориметра. Результаты таких измерений позволяют однозначно оценить разрешающую способность всего детек-

тора с привлечением численного моделирования и параметров, полученных экспериментальным путем.

В данном разделе представлены результаты тестовых исследований матрицы 3×3 кристаллов PWO-II (2×2×20 см) с ЛФД (активная площадь 1 $см^2$) в качестве фотодетектора на пучках γ-квантов. Экспериментальная установка была собрана на базе ***Tagged Photon Facility*** в научно-исследовательском центре MAMI (Майнц, Германия). Пучок вторичных γ-квантов формировался в результате коллимации фотонов тормозного излучения, образовавшихся в результате прохождения первичного пучка электронов с энергией 855 МэВ через никелевый радиатор. Энергия γ-кванта определялась по разнице энергий электрона первичного пучка до вхождения в радиатор и этого же электрона регистрируемого после прохождения его через радиатор. Траектория пучка электронов задавалась конфигурацией магнитного поля, создаваемого дипольным магнитом. Диапазон энергии γ-квантов составлял 40–675 МэВ. Температура матрицы составляла 0 °С.

На рисунке 2 представлена экспериментальная зависимость энергетического разрешения матрицы 3×3 кристаллов вольфрамата свинца от энергии γ-квантов и результат ее фитирования выражением вида

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{1.98\%}{\sqrt{E}} \oplus 1.68\,\%.$$

Полученное значение статистического члена энергетического разрешения, равное 1.98 %, удовлетворяет требованиям экспериментальной программы проекта PANDA. При этом следует ожидать дальнейшего уменьшения статистического члена энергетического разрешения при понижении рабочей температуры матрицы до –25 °С.

6. Заключение

Улучшение структурного совершенства синтетических кристаллов вольфрамата свинца позволяет снизить концентрацию активаторов иттрия и лантана, используемых для повышения радиационной стойкости кристаллов, до суммарной концентрации 40 ppm. Тем самым достигается двукратное увеличение выхода сцинтилляций в кристалле при +25 °С, до 19±2 фэ/МэВ, для элементов длиной более 20 см, при сохранении их радиационной стойкости и быстродействия сцинтилляций.

Понижение температуры эксплуатации данного кристалла до –25 °С позволяет увеличить световыход дополнительно не менее чем в четыре раза, при этом 90 % света сцинтилляций высвечивается за время не более 200 нс. Таким образом, суммарное увеличение световыхода кристаллов PWO-II при температуре –25 °С составляет 8–9 раз в сравнении с кристаллами для ЭМК эксперимента CMS, которые будут эксплуатироваться при комнатной температуре.

Полученное значение статистического члена энергетического разрешения для матрицы 3×3 кристаллов PWO-II с ЛФД при температуре 0 °С удовлетворяет требованиям к ЭМК эксперимента PANDA. Это позволит применять кристалл PWO-II в детекторах, работающих в диапазоне низких и средних энергий γ-квантов и электронов, начиная с 10 МэВ, на ускорителях с большой светимостью.

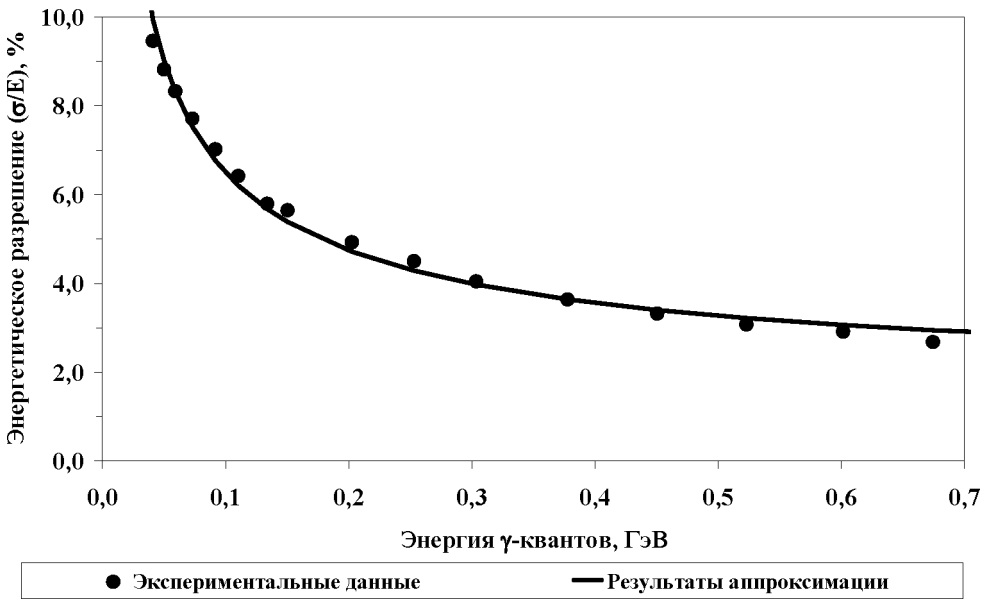

Рис. 2. Энергетическое разрешение матрицы 3×3 кристаллов вольфрамата свинца с ЛФД в качестве фотодетекторов. Температура 0 °С

Литература

1. *Annenkov A. N., Korzhik M.V., Lecoq P.* // NIM 2002. Vol. A490, №1/2. P. 30.
2. *Kubantsev M.* et al. // e-Print ArXive physics, 0609201; JLAB-PHY-06-528. 2006.
3. *Price M.J.* // NIM. 2002. Vol. A478, № 1/2. P. 46.
4. *Franzke B.* et al. // NIM. 2004. Vol. A532, № 1/2. P. 97.
5. *Lehrach A.* et al. // NIM. 2006. Vol. A561, № 1. P. 289.
6. *Peters K.*// NIM. 2004. Vol. B214. P. 60.
7. *Schmitt L. et al.* // NIM. 2007. Vol. A581, № 1/2. P.542.
8. *Борисевич А.Е.* и др. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 2. С. 59.
9. *Fedorov A.* et al. // SCINT2005: Proc. 8th Intern. Conf. on inorganic scintillators and their use in scientific and industrial applications. 2006. P. 389.
10. *Nikl M.* et al. // Phys. Stat. Sol. (b). 1996. Vol.195, № 1. P. 311.

ELECTROMAGNETIC CALORIMETER BASED ON THE LEAD TUNGSTATE CRYSTALS FOR THE PANDA EXPERIMENT (GSI, GERMANY)

V. I. Dormenev, G. Yu. Drobychev, M. V. Korzhik, O. V. Missevitch

New accelerator FAIR (Facility for Antiproton and Ions Researches) will be created at the nearest future at GSI (Darmstadt, Germany). The PANDA detector will be installed at the FAIR for the hadron physics studies using a cooled antiproton beams. PWO-II a new type of the lead tungstate crystal was chosen as a scintillation material for the electromagnetic calorimeter construction of the PANDA detector. Some research results of the PWO-II crystal light yield improvement and beam test of the 3×3 crystals matrix in the temperature range from –25 °C till +25 °C are presented at the paper.