

УДК 539.1.074.3

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ФТОРИДНЫЕ СТЕКЛА ДЛЯ ГОМОГЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И АДРОННЫХ КАЛОРИМЕТРОВ

М. В. Белов, М. В. Завертяев, В. А. Козлов,
Н. В. Пестовский, С. Ю. Савинов

Исследованы оптические и люминесцентные характеристики образца (модуля) фторидного сцинтилляционного стекла на основе фторида гафния с целью его использования в однородных электромагнитных и адронных калориметрах. Световыход модуля составил 290 фотонов/МэВ и время высвечивания 21 нсек. Расчетное энергетическое разрешение прототипа электромагнитного калориметра на основе фторидных стекол составило 0.4% для энергии 100 ГэВ. Показана возможность регистрации черенковского и сцинтилляционного света с противоположных торцов стеклянного модуля, что позволяет улучшить энергетическое разрешение адронного калориметра.

Ключевые слова: фторидные стекла, фторид гафния, однородные электромагнитные калориметры, сцинтилляционные кристаллы.

В современных экспериментах в области физики высоких энергий однородные электромагнитные калориметры (ECAL) на основе сцинтилляционных кристаллов обеспечивают высокое разрешение при измерении энергии электронов и фотонов [1]. В качестве радиаторов современных электромагнитных калориметров используются сцинтилляционные кристаллы с высокой плотностью, такие как PbWO_4 и LYSO.

Основная задача адронной калориметрии в настоящее время – это улучшение энергетического разрешения для выделения W и Z векторных бозонов по их адронным модам распада в экспериментах на линейных коллайдерах [2]. Современные адронные калориметры имеют слоистую структуру, когда активные слои чередуются со слоями

поглотителя. Такая структура сильно ухудшает разрешение адронных калориметров за счет флуктуаций в слоях поглотителя. Кроме того, вклад электромагнитной компоненты от распадов нейтральных пионов в адронном ливне сильно флуктуирует от события к событию, ухудшая энергетическое разрешение калориметра. Использование однородных прозрачных сред в качестве радиаторов адронных калориметров полного поглощения позволяет существенно улучшить их энергетическое разрешение [1, 2]. Кроме того, прозрачные кристаллические радиаторы позволяют раздельное считывание с противоположных торцов черенковского и сцинтилляционного света с помощью оптических фильтров. Используя коррекцию сигнала калориметра от ливня к ливню за счет раздельных измерений черенковского и сцинтилляционного света, можно улучшить энергетическое разрешение гомогенного адронного калориметра (HNCAL).

Одним из перспективных направлений в этой области является разработка и исследование сцинтиллирующих стекол, производство которых более производительнее по сравнению с выращиванием кристаллов. В конце 1991 г. в Физическом институте РАН были впервые исследованы сцинтиллирующие фторидные стекла на основе фторида гафния (HFG), имеющие плотность 6 г/см^3 и радиационную длину 1.6 см , изготовленные в Институте общей физики РАН [3]. В дальнейшем исследования характеристик тонких образцов фторидных стекол различных составов были продолжены с целью повышения световых выходов [4, 5]. Данная статья посвящена исследованию характеристик образца (модуля) фторидного стекла размером $20 \times 25 \times 55 \text{ мм}^3$ с составом $54\text{HfF}_4 - 20\text{BaF}_2 - 5\text{CeF}_3 - 2.5\text{Al}_3 - 18\text{NaF} - 0.5\text{InF}_3$ с целью использования в гомогенных адронных и электромагнитных калориметрах. Указанный состав фторидного стекла был выбран как наиболее оптимальный с точки зрения получения прозрачных отливок большого размера.

Для изучения спектров импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) фторидных стекол использовалась установка на основе ускорителя электронов РАДАН-ЭКСПЕРТ, генерирующего импульсы электронов со средней энергией 150 кэВ , а также спектрографа OCEAN FLAME-S-XR1-ES с диапазоном длин волн $200 \div 1025 \text{ нм}$. Измерение оптического пропускания модуля проводилось на спектрофотометре Kruss Optronic VIS6500. Измеренные спектры оптического пропускания и ИКЛ, а также расчетный спектр черенковского излучения для сцинтилляционного модуля фторидного стекла представлены на рис. 1.

Световой выход модуля фторидного стекла определялся по спектру полного поглощения (фотопику) γ -квантов с энергией 662 кэВ на установке, описание которой приведено в

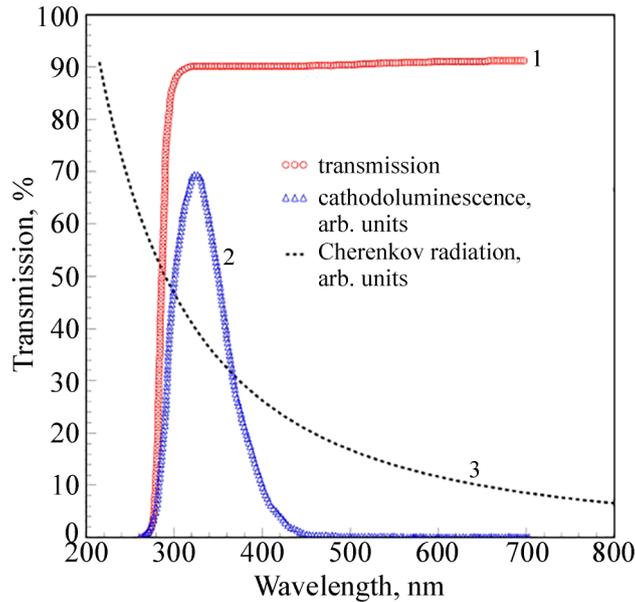


Рис. 1: Оптическое пропускание (1), спектры катодолуминесценции (2) и черенковского излучения (3) для модуля сцинтилляционного фторидного стекла размером $20 \times 25 \times 55$ мм³.

нашей работе [6]. В качестве материала обертки модуля использовался эффективный диффузный отражатель Lumigor с коэффициентом отражения 0.98 для получения максимального выхода света из модуля. На рис. 2(а) приведен фотопик для фторидного стекла от источника ^{137}Cs .

Световыход фторидного стекла в терминах фотонов/МэВ определялся путем сравнения положения его фотопика с аналогичным распределением от хорошо известного сцинтиллятора CeF_3 [7]. Предполагая, что чувствительность фотоумножителя к высвечиванию CeF_3 и фторидного стекла одинакова из-за близко лежащих их эмиссионных спектров, получаем световыход фторидного стекла 290 фотонов/МэВ.

Время высвечивания сцинтиллирующих фторидных стекол исследовалось на установке с использованием метода “задержанных совпадений” [6]. На рис. 2(б) представлена зависимость интенсивности высвечивания от времени для фторидного стекла. При фитировании временного спектра функцией с одной экспонентой получаем время высвечивания 21.1 ± 0.2 нсек.

Для расчетов энергетического разрешения электромагнитного калориметра на основе фторидных стекол было проведено моделирование с помощью программы GEANT4 матрицы из 9 модулей 3×3 с размерами каждого модуля $22 \times 22 \times 320$ мм³. Для рас-

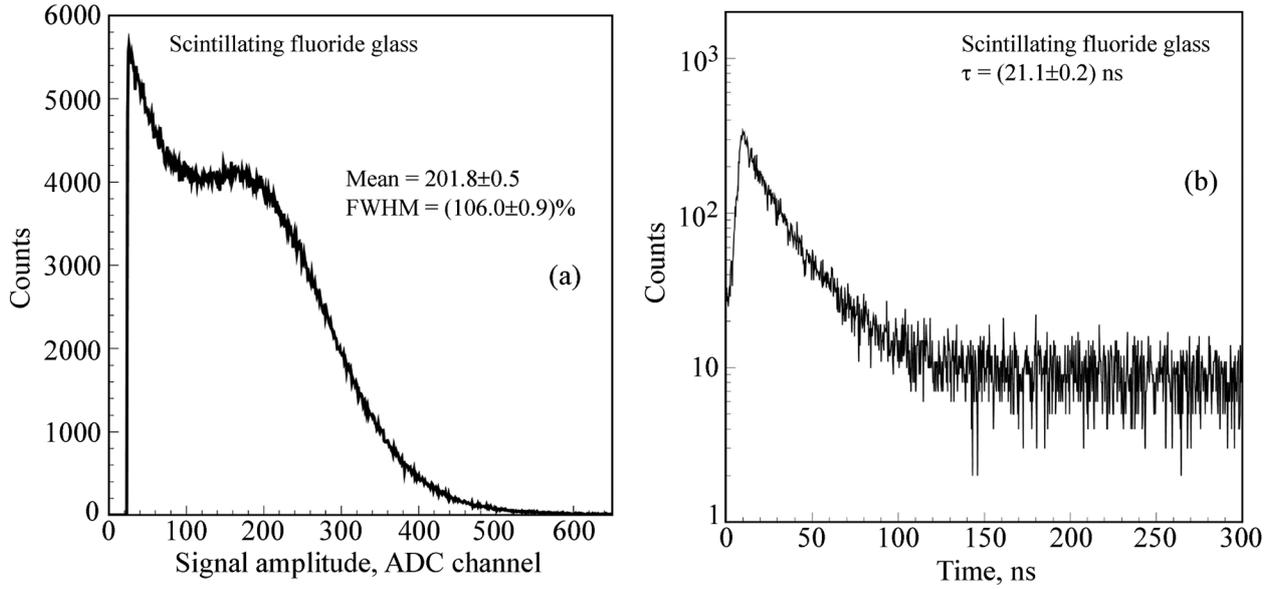


Рис. 2: Амплитудное распределение образца сцинтилляционного фторидного стекла, облученного γ -квантами от источника ^{137}Cs (a) и зависимость интенсивности высвечивания от времени (b).

четов использовались квантовая эффективность фотоумножителей R4125Q, а также спектры оптического поглощения и катодолуминесценции фторидных стекол. Результатом расчетов были распределения Гаусса числа фотоэлектронов, образовавшихся на фотокатоде ФЭУ. Энергетическое разрешение вычислялось как σ_E/E , где σ_E и E были параметрами распределения Гаусса. Зависимость энергетического разрешения от энергии электронов (рис. 3) фитировалась функцией вида:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{b}{\sqrt{E}} \oplus c,$$

где E – энергия электрона в ГэВ, \oplus – знак квадратичного суммирования. Были получены следующие параметры фитирования: $b = (3.42 \pm 0.6)\%$, $c = (0.20 \pm 0.05)\%$.

Также изучался отклик модуля фторидного стекла от релятивистских мюонов космических лучей, которые возбуждают в модуле сцинтилляции и испускают черенковский свет. Мюоны проходили через модуль фторидного стекла, который находился между двумя сцинтилляционными счетчиками, включенными на совпадение для формирования триггера. Измерения сигналов от сцинтилляций и черенковского света проводились с помощью автоматизированного цифрового запоминающего осциллографа LA-n4USB.

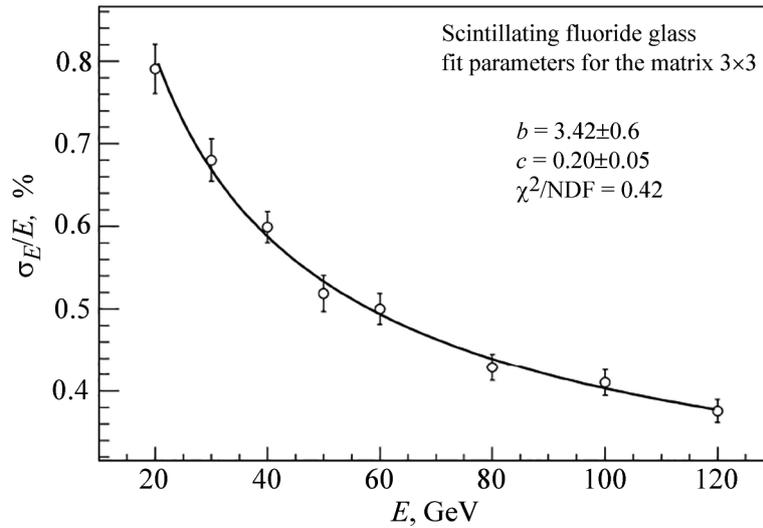


Рис. 3: Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра на основе сцинтилляционных фторидных стекол в зависимости от энергии электронного пучка.

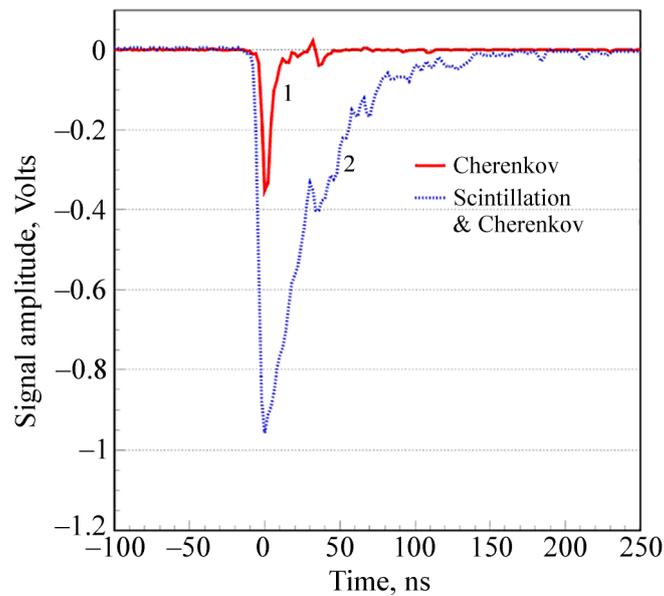


Рис. 4: Сигналы черенковского (1) и сцинтилляционного (2) света от модуля фторидного стекла, облучаемого мюонами космических лучей.

Для измерений сцинтилляционного и черенковского сигналов использовались светофильтры, которые помещались между фотоумножителем и блоком фторидного стекла. Из рис. 1 видно, что при использовании на торце модуля фторидного стекла оптического фильтра ЖС-10 ($\lambda > 400$ нм) регистрируется только черенковский свет. С другой

стороны, оптический фильтр УФС-5 ($250 \text{ нм} < \lambda < 400 \text{ нм}$) будет пропускать сцинтилляционный свет от фторидного стекла и часть черенковского света, вклад которого можно вычесть, используя измерения для фильтра ЖС-10 и расчетный спектр черенковского излучения.

На рис. 4 представлены импульсы от релятивистских мюонов космических лучей, которые возбуждают в модуле фторидного стекла сцинтилляции, а также испускают черенковский свет.

В результате проведённых исследований показано, что энергетическое разрешение прототипа электромагнитного калориметра на основе фторидных стекол составляет 0.4% для энергии электронов 100 ГэВ и, таким образом, фторидные стёкла могут использоваться в экспериментах физики высоких энергий наравне со сцинтилляционными кристаллами [8]. Также показана принципиальная возможность отдельной регистрации сцинтилляционного и черенковского света с противоположных торцов модуля фторидного стекла, что позволяет корректировать сигнал адронного калориметра от события к событию, и таким образом улучшать энергетическое разрешение адронного калориметра.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Rihua Mao, Liyuan Zhang, Ren-Yuan Zhu, IEEE Trans. Nucl. Sc. **59**, 2229 (2012). DOI: 10.1109./TNS.2012.2192290.
- [2] A. Driutti, A. Para, G. Pauletta, et al., Journal Phys. Conf. Ser. **293**, 012034 (2011). DOI: 10.1088/1742-6596/293/1/012034.
- [3] E. G. Devitsin, L. N. Dmitruk, V. A. Kozlov, et al., Heavy scintillating fluoride glasses as promising materials for electromagnetic calorimetry in high energy physics. Proceedings of “Crystal 2000” Inter. Workshop on Heavy Scintillators for Scientific and Industrial Application, Sept. 22-26, 1992, Chamonix, France, ed. by F. De Notaristefani, P. Lecoq, M. Schneegans, Edition Frontieres, Gif-sur-Yvette Cedex, France, 1993, 401-406. ISBN 2-86332-128-5.
- [4] L. Dmitruk, N. Vinogradova, V. Kozlov, et al., J. Non-Cryst. Solids **213&214**, 311 (1997). DOI: 10.1016/S0022 3093(97)00042 2.
- [5] E. G. Devitsin, N. Yu. Kirikova, V. A. Kozlov, et al., Nucl. Instr. Meth. A **405**, 418 (1998). DOI: 10.1016/S0168-9002(97)01045-0.
- [6] М. В. Белов, Ю. Д. Заварцев, М. В. Завертяев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **46(8)**, 29 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619080050.

- [7] A. J. Wojtovicz, M. Balcerzyk, E. Berman, A. Lempicki, Optical spectroscopy and scintillation mechanisms of $Ce_xLa_{1-x}F_3$. DOI: 10.1103/PhysRevB.49.14880.
- [8] Marcella Diemoz, Nucl. Instr. Meth. A **581**, 380 (2007). DOI: 10.1016/j.nima.2007.08.008.

Поступила в редакцию 4 августа 2020 г.

После доработки 23 сентября 2021 г.

Принята к публикации 24 сентября 2021 г.