

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.07

ДЕТЕКТОР ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКИХ  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРАХ

© 2013 г. В. В. Бердников, Ю. Б. Гуров, **Б. А. Долгошеин**, В. В. Дмитренко,  
Б. И. Заднепровский, В. А. Канцеров, В. В. Сосновцев, В. О. Тихомиров\*, А. П. Шмелева\*

*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”*

*Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31*

*\*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН*

*Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53*

Поступила в редакцию 10.04.2012 г.

Исследована возможность создания прототипа сцинтилляционного детектора переходного излучения (с.д.п.и.) на основе тонкого (~200 мкм) неорганического сцинтиллятора. Измерения с образцами неорганического сцинтиллятора на основе  $\text{LuVO}_3:\text{Ce}$  и спектросмещающими волокнами проводились с помощью вакуумного и кремниевого фотоумножителей. Экспериментально определены коэффициент светосбора с опытных образцов сцинтиллятора от источников  $\gamma$ -излучения и количество фотоэлектронов при облучении источником  $\gamma$ -квантов  $^{241}\text{Am}$  рабочего вещества с.д.п.и. Ожидается, что коэффициент режекции электронов от адронов для предлагаемого с.д.п.и. составит ~30.

DOI: 10.7868/S0032816213010291

ВВЕДЕНИЕ

В традиционных детекторах переходного излучения (д.п.и.) [1] для регистрации заряженной частицы, а также рожденных ею  $\gamma$ -квантов переходного излучения используются газовые детекторы на основе аргона или ксенона. Принцип работы, технология изготовления и условия эксплуатации газовых детекторов хорошо известны. Однако необходимость использования достаточно громоздкой системы газового обеспечения, включающей в себя систему очистки газа, циркулирующего через объем детектора, усложняет условия эксплуатации д.п.и. Особенно это актуально для установок, расположенных на космических аппаратах.

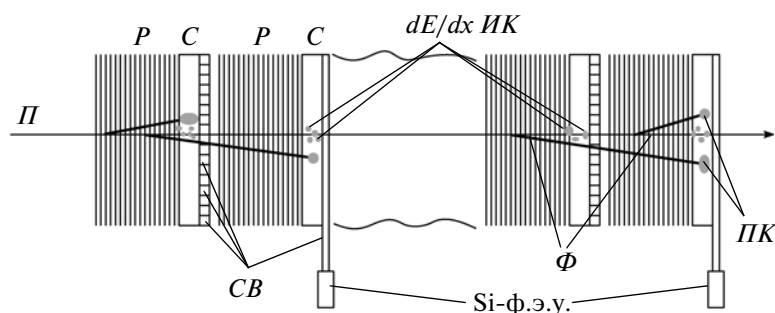
В качестве альтернативы газовому детектору для регистрации  $\gamma$ -квантов переходного излучения можно использовать твердотельный, например, сцинтилляционный детектор переходного излучения (с.д.п.и.). Основными проблемами при создании такого детектора являются выбор сцинтиллятора и сбор света на фотоприемник. Оптимальная толщина сцинтиллятора д.п.и. должна обеспечивать надежное разделение сигналов от ионизационных потерь, оставленных частицей в рабочем веществе детектора, и ионизационных потерь  $\gamma$ -квантов переходного излучения. Если в типичном газовом детекторе на основе ксенона толщина рабочего вещества составляет ~1 см, то эквивалентный сцинтиллятор на основе лютетия должен иметь толщину ~10 мкм.

СХЕМА С.Д.П.И.

На рис. 1 представлена схема предлагаемого детектора переходного излучения на тонких сцинтилляторах со считыванием информации с помощью кремниевого фотоумножителя (ф.э.у.).

Детектор состоит из нескольких идентичных секций. Каждая секция содержит радиатор в виде полипропиленовых пленок, в котором происходит генерация  $\gamma$ -квантов переходного излучения. Далее расположен тонкий слой сцинтиллятора, где регистрируются проходящая заряженная частица и  $\gamma$ -кванты переходного излучения. За сцинтиллятором находится слой спектросмещающих волокон (с.в.) (сечением  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ ) для сбора света от сцинтилляционной вспышки.

Регистрация света с торцов волокон осуществляется фотоприемниками на основе кремниевых ф.э.у. Для уменьшения общего количества последних предлагается девять волокон сечением  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  собрать в одну группу, и полученную матрицу оптически соединить с кремниевым ф.э.у.  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . Следует отметить, что в качестве фотоприемника можно использовать обычные вакуумные фотоумножители, поместив сцинтилляционную пленку непосредственно на входное окно ф.э.у. Однако в такой конфигурации практически невозможно построить многосекционный д.п.и. из-за слишком большого количества вещества на пути регистрируемой частицы, внесимого фотоумножителями. При этом обеспечить достаточно высокую степень идентифика-



**Рис. 1.** Схема с.д.п.и. *П* – пучок частиц; *Р* – радиатор; *С* – сцинтиллятор; *СВ* – спектросмещающие волокна; *ИК* – ионизационный кластер, оставленный частицей; *ПК* – ионизационный кластер фотона переходного излучения;  $\Phi$  – фотон переходного излучения.

ции частиц с помощью одно- или двухсекционного детектора крайне проблематично.

### ПАРАМЕТРЫ С.Д.П.И.

В простейшем случае разделение сигналов от электронов и адронов может быть выполнено путем измерения числа фотоэлектронов, регистрируемых всеми секциями с.д.п.и. Одним из важнейших параметров, определяющих режекционную способность с.д.п.и., является эффективность сбора света, произведенного в сцинтилляторе.

Количество первичных фотоэлектронов (ф.э.) в фотодетекторе (или, более точно, число сработавших пикселей в случае кремниевого ф.э.у.) может быть определено как

$$N_{\text{ф.э.}} = Ek, \quad (1)$$

где  $N_{\text{ф.э.}}$ , ф.э. – число зарегистрированных фотоэлектронов;  $E$ , кэВ – энергетические потери (ионизационные от первичной частицы и  $\gamma$ -кванта переходного излучения) в веществе сцинтиллятора;  $k$ , ф.э./кэВ – коэффициент светосбора.

Коэффициент  $k$  представляет собой произведение световых выхода сцинтиллятора, эффективности захвата света из сцинтиллятора в волокно, эффективности переизлучения света в волокне и транспортирования его от точки переизлучения до фотоприемника, а также квантовой эффективности фотоприемника. Значение коэффициента светосбора  $k$  может быть получено в результате измерений. По приблизительным оценкам, световой выход неорганических сцинтилляторов на основе лютеция составляет  $\sim 30$  фотонов/кэВ, эффективность захвата света из сцинтиллятора в волокно  $\sim 0.2$ , эффективность переизлучения и транспортировки света в волокне  $\sim 0.07$ , эффективность фотоприемника на основе кремниевого ф.э.у. фирмы HAMAMATSU – 0.4 [2]. Таким образом, оценка дает величину коэффициента светосбора  $k \sim 0.17$ . Ионизационные потери заряженной частицы в слое сцинтиллятора на основе лютеция

толщиной 10 мкм составляют  $\sim 10$  кэВ, а типичная энергия кванта переходного излучения  $\sim 15$  кэВ. С учетом этого можно ожидать регистрацию  $\sim 1.7$  ф.э. от ионизационных потерь и  $\sim 2.5$  ф.э. от кванта переходного излучения. Очевидно, что такое незначительное число фотоэлектронов подвержено сильным статистическим флуктуациям, что может отрицательно сказаться на режекционной способности с.д.п.и.

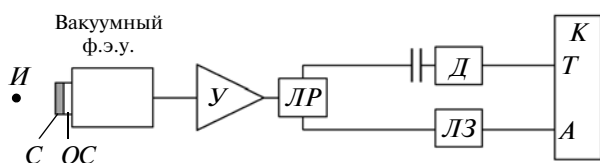
### ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОХОДА ТОНКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

Для экспериментальной проверки возможности регистрации  $\gamma$ -кванта переходного излучения с помощью тонкого сцинтиллятора использовались образцы пленок с различными концентрациями гранул кристаллического вещества сцинтиллятора. В качестве исходного материала был выбран кристаллический ортоборат лютеция, активированный церием.  $\text{LuVO}_3:\text{Ce}$  является наиболее быстрым сцинтиллятором с большими световым выходом и атомным номером  $Z$ . В работе использовались образцы пленки, полученные путем растворения гранул нанопорошка  $\text{LuVO}_3:\text{Ce}$  в оптически прозрачном эпоксидном клее.

В диапазоне энергий  $\gamma$ -квантов, характерном для переходного излучения, доминирующим типом взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом пленки является фотоэффект, сечение которого для  $\text{LuVO}_3:\text{Ce}$  на несколько порядков выше, чем для эпоксидной связки. При этом потери энергии  $\gamma$ -квантов происходят дискретными порциями, распределенными по  $N$  гранулам сцинтиллятора размером 1–2 мкм, и расходуются на ионизацию и образование фотоэлектронов [3].

Исследования характеристик различных образцов сцинтиллятора на основе  $\text{LuVO}_3:\text{Ce}$  проводились с использованием фотоумножителя ФЭУ-143 (рис. 2).

Образец пленки площадью  $12 \times 12$  мм<sup>2</sup> с помощью оптической смазки был приклеен к входно-



**Рис. 2.** Схема установки. *И* — источник  $^{55}\text{Fe}$  или  $^{241}\text{Am}$ ; *С* — сцинтиллятор; *ОС* — оптическая смазка; *У* — усилитель; *ЛР* — линейный разветвитель; *ЛЗ* — линия задержки; *Д* — дискриминатор; *Т* — триггерный вход; *А* — аналоговый вход; *К* — кодировщик.

му окну ф.э.у. Противоположная поверхность пленки зазеркалена. Сцинтиллятор облучался источниками  $\gamma$ -квантов  $^{241}\text{Am}$  и  $^{55}\text{Fe}$ . Измерение амплитудного распределения сигналов с ф.э.у. проводилось в режиме самозапуска, т.е. строб-сигнал для кодировщика формировался от сигнала с ФЭУ-143.

Количество фотоэлектронов оценивалось с помощью ФЭУ-143, откалиброванного в одноэлектронном режиме, при импульсной засветке светодиодом (рис 3а). После обработки спектра было вычислено положение центра пика пьедестала (1) и положение центра пика (2) от одного фотоэлектрона. По разнице этих положений определено, что одному фотоэлектрону соответствует  $4.5 \pm 0.5$  канала кодировщика. Амплитудные спектры сигналов с тонкого сцинтиллятора представлены на рис. 3б и 3в. Среднее количество фотоэлектронов с пленки при облучении ее источниками  $^{241}\text{Am}$  и  $^{55}\text{Fe}$  составляет 18 и 8 фотоэлектронов соответственно, что соответствует коэффициенту светосбора  $\sim 1.2$  ф.э./кэВ.

### ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОСБОРА С.Д.П.И.

Для тонкого сцинтиллятора достаточно большой площади возникает проблема светосбора на

кремниевый фотодиод ф.э.у. Это возможно с помощью спектросмещающих волокон.

Схема установки для исследования возможности регистрации  $\gamma$ -квантов с помощью спектросмещающих волокон и кремниевого ф.э.у. представлена на рис. 4.

Образец сцинтилляционной пленки размещают на плоскости из квадратных переизлучающих волокон сечением  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>. Торцы девяти волокон уложены в квадрат площадью  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup> и состыкованы с чувствительной областью кремниевого ф.э.у. НАМАМАТСУ. Свободные торцы волокон заклеены зеркальной пленкой. Сцинтиллятор облучается источником  $\gamma$ -квантов  $^{241}\text{Am}$ . Часть света ( $\sim 0.2$ ) от сцинтилляционных вспышек захватывается волокнами, переизлучается и транспортируется к чувствительной области кремниевого ф.э.у. Остальная часть регистрируется ФЭУ-143. Сигнал с вакуумного ф.э.у. является строб-сигналом для запуска кодировщика при измерении амплитуды сигнала, зарегистрированного кремниевым ф.э.у.

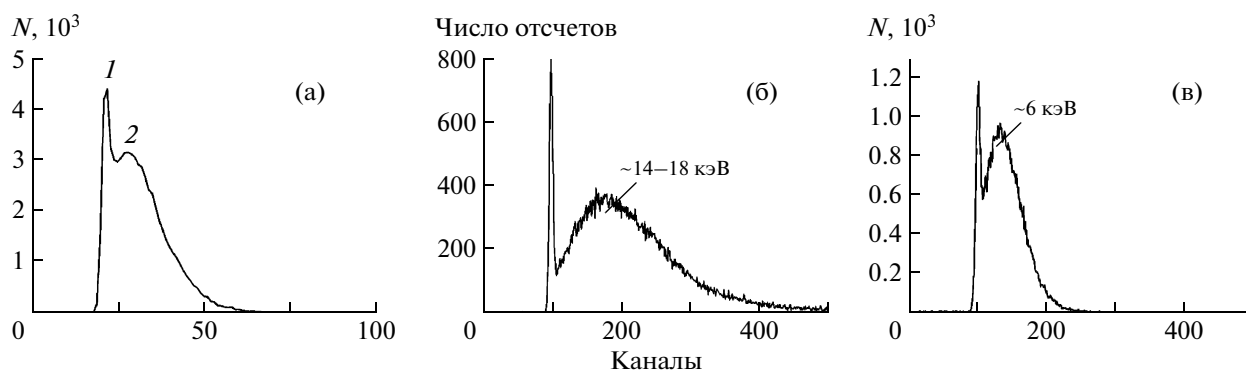
Амплитудный спектр сигналов с кремниевого ф.э.у. и фоновый спектр сигналов в отсутствие источника  $^{241}\text{Am}$  приведены на рис. 5а. На рис. 5б представлен амплитудный спектр сигналов от кремниевого ф.э.у. за вычетом фона.

Количество фотоэлектронов, зарегистрированных кремниевым ф.э.у., может быть вычислено по нулевому пику амплитудного распределения на основе пуассоновского закона распределения флуктуаций зарегистрированных фотонов на ф.э.у.:

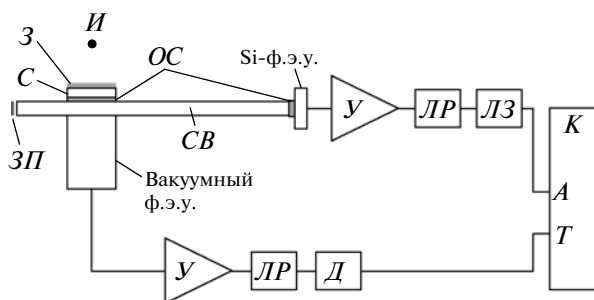
$$N_{pix}^{\text{Si-ф.э.у.}} = \ln(1/P(0)) = \ln(S_t/S_0), \quad (2)$$

где  $P(0)$  — вероятность того, что не сработает ни одна ячейка;  $S_t$  — полное число зарегистрированных событий;  $S_0$  — число событий под нулевым пиком.

Измерения показали, что количество фотоэлектронов составило  $\sim 1.8$  при облучении источ-



**Рис. 3.** а — спектр ФЭУ-143 в одноэлектронном режиме при импульсной засветке светодиодом (1 — положение центра пика пьедестала, 2 — положение центра пика); б, в — амплитудные спектры ФЭУ-143 при облучении пленки  $\gamma$ -источниками  $^{241}\text{Am}$  или  $^{55}\text{Fe}$  соответственно.



**Рис. 4.** Схема установки. *И* – источник  $^{241}\text{Am}$ ; *З* – зеркало; *ЗП* – зеркальная пленка; *С* – сцинтиллятор; *ОС* – оптическая смазка; *СВ* – набор из девяти с.в.  $1 \times 1$  мм; *У* – усилитель; *ЛР* – линейный разветвитель; *ЛЗ* – линия задержки; *Д* – дискриминатор; *А* – аналоговый вход; *Т* – триггерный вход; *К* – кодировщик.

ником  $\gamma$ -квантов  $^{241}\text{Am}$ , это соответствует коэффициенту светосбора 0.12 ф.э./кэВ. Следует отметить, что при использовании кремниевого ф.э.у. с более высокой эффективностью регистрации (в области 500 нм) количество фотоэлектронов можно увеличить до 0.25 ф.э./кэВ.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ С.Д.П.И.

Оценка ожидаемых характеристик предлагаемого с.д.п.и. была выполнена с помощью компьютерного моделирования методом Монте-Карло. При моделировании учитывались геометрия детектора (радиаторы, пленки со сцинтилляционными гранулами, с.в.), а также физические процессы (генерация и поглощение фотонов переходного излучения,  $dE/dx$ -ионизация и др.) Программа основана на пакете GEANT3 [5], а в части моделирования ионизационных потерь и генерации переход-

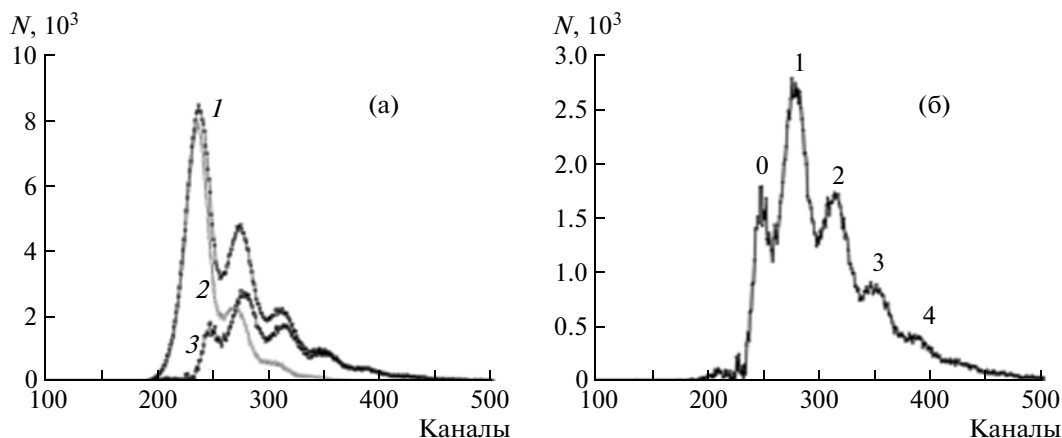
ного излучения – на коде [6], используемом в эксперименте ATLAS на LHC [7]. Световыход сцинтиллятора, захват и распространение света в волокнах, эффективность фотодетектора учитывались заданием ожидаемого коэффициента светосбора  $k$  (0.17). Также учитывались статистические флуктуации числа фотоэлектронов, зарегистрированных кремниевым ф.э.у.

Для получения максимальной режекционной способности с.д.п.и. проводилась оптимизация по различным параметрам: числу секций (при заданной общей длине детектора 50 см), параметрам радиатора (толщине пленок и расстоянию между ними); типичному размеру сцинтилляционных гранул и их общей толщине на пути первичной частицы.

Моделирование показало, что оптимальным является применение гранул размером  $\sim 1.5$  мкм при их общей толщине в одной секции  $\sim 10$  мкм. Оптимальный радиатор должен состоять из полипропиленовых пленок толщиной  $\sim 20$ – $30$  мкм и шагом между ними  $\sim 250$  мкм.

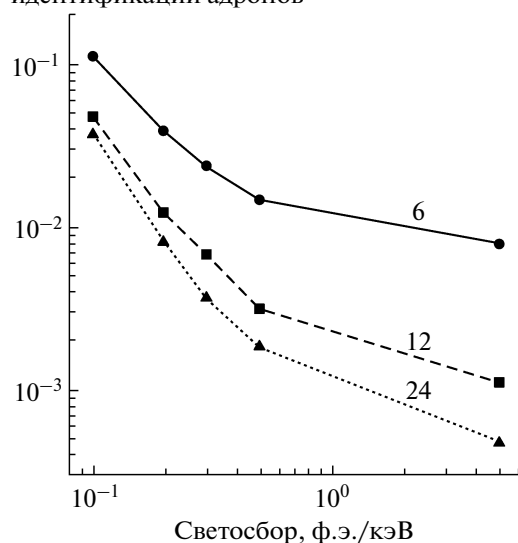
На рис. 6 представлены полученные в результате моделирования зависимости режекционной способности с.д.п.и. от коэффициента светосбора  $k$  для различного числа секций в детекторе при его фиксированной общей длине 50 см. Из приведенного графика следует, что оптимальное число секций составляет  $\sim 12$ . Детектор с таким числом секций будет значительно проще и дешевле, чем с 24-мя секциями, при незначительном ухудшении в режекции. При экспериментально достигнутом коэффициенте светосбора  $k = 0.12$  (на рисунке указано стрелкой) можно ожидать режекцию  $\sim 30$  для 12-секционного с.д.п.и.

Другим важным обстоятельством, следующим из рис. 6, является сильная зависимость режекции от коэффициента светосбора. Это обусловле-



**Рис. 5.** Спектры сигналов с кремниевых ф.э.у.: **а** – амплитудный (1), фоновый (2), амплитудный за вычетом фонового (3); **б** – амплитудный спектр за вычетом фона (цифры у пиков соответствуют количеству сработавших пикселей (ячеек)) [4].

Вероятность ошибочной  
идентификации адронов



**Рис. 6.** Зависимость режекционной способности с.д.п.и. от коэффициента светосбора для различного числа секций в детекторе (цифры у кривых). По оси  $Y$  отложена вероятность ошибочной идентификации адронов при 90%-ной эффективности регистрации электронов — величина, обратная коэффициенту режекции.

но малым числом фотоэлектронов, регистрируемых кремниевыми ф.э.у., и, как следствие, значительными статистическими флуктуациями этого числа. Флуктуации “размывают” выдаваемые детектором амплитудные сигналы от электронов и адронов, затрудняя их идентификацию. Увеличение светосбора может значительно улучшить режекционную способность с.д.п.и.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана принципиальная возможность построения детектора переходного излучения на основе тонких неорганических сцинтилляторов. Проведены измерения световыходов от  $\gamma$ -источников  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{241}\text{Am}$  на полученных образцах. Показано, что предлагаемый с.д.п.и. может иметь фактор режекции электронов от адронов  $\sim 30$ . Основным фактором, ограничивающим режекционную способность предложенного детектора, является относительно низкая эффективность сбора и регистрации света от сцинтиллятора с помощью кремниевых ф.э.у. Поиск новых сцинтилляторов и фотодетекторов представляется первоочередной задачей при продолжении работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dolgoshein B.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Research. 1986. V. A252. P. 137.
2. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)
3. *Заднепровский Б.И., Сосновцев В.В., Перменов Д.Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 17. С. 64.
4. *Бужан П.Ж., Долгошеин Б.А., Канцеров В.А. и др.* // III Всеросс. научно-техн. конф. “Университеты России — фундаментальные исследования”. Сб. науч. трудов. М.: МИФИ, 2002. С. 51.
5. *Brun R., Hagelberg R., Hansroul M. et al.* Preprint CERN-DD-78-2-REV. Geneva, 1978. P. 76.
6. *Neviski P.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Physics Research. 2004. V. A522. P 116.
7. *Aad G., Abat E., Abdallah J. et al.* // Journal of Instrumentation. 2008. V. 3. P. S0800.