

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ СВЕТОВОДОВ

## EXPERIMENTAL STUDIES OF SCINTILLATION DETECTORS BASED ON THE WAVELENGTH SHIFTING FIBERS

*Н. Г. Игнатьев, И. Е. Орлов, Д. Э. Эргашев*  
*N. G. Ignatiev, I. E. Orlov, D. E. Ergashev*

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова» (ВНИИА)  
Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Automatics n.a. N. L. Dukhov»

Описаны конструкции и представлены результаты экспериментальных исследований сцинтилляционного детектора с волоконно-оптическим светосбором на основе спектро-сдвигающих световодов. Детектор с волоконно-оптическим светосбором предназначен для регистрации импульсного ионизирующего излучения с длительностью до 20 мкс. Конструкция такого детектора позволяет размещать фотоприемник на расстоянии десятков метров от сцинтиллятора. Исследованы временное разрешение и чувствительность детектора с волоконно-оптическим светосбором к  $\gamma$ -квантам  $^{60}\text{Co}$  с энергией 1,25 МэВ. Экспериментальные исследования проведены во ФГУП "ВНИИА им. Н.Л. Духова".

This paper presents the description of the design and the results of experimental studies of scintillation detector with a fiber-optic light-collection based on wavelength shifting fibers. Detector with optical fiber light collection designed for the registration of pulse ionizing radiation with duration up to 20 ms. The design of this detector allows to place photodetector at a distance of tens of meters from the scintillator. The temporal resolution and sensitivity of the detector with a fiber-optic light-collection to  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -quanta with an energy of 1,25 MeV was investigated. Experimental studies was provided in FSUE «All-Russian Research Institute of Automatics n.a. N.L. Dukhov».

### Введение

Применение в сцинтилляционных детекторах  $\gamma$ - и нейтронного излучения спектро-сдвигающих световодов (WLS-световодов) с боковым светосбором позволяет реализовать эффективный светосбор с больших площадей сцинтилляторов. Преимуществом таких детекторов с волоконно-оптическим светосбором (ВОС) является возможность использования нескольких фотоприемников с одним сцинтиллятором для расширения диапазона амплитуд регистрируемых импульсов. Используя модульный принцип построения детектора, разделяя сцинтилляционную и электронную части, становится возможным разместить фотоприемники на расстоянии до нескольких десятков метров от сцинтиллятора. Оптический характер передаваемого сигнала обеспечивает возможность его деления или ослабления светоделителями, чьи характеристики не зависят от ча-

стотного диапазона оптического излучения. При этом реализуется полная развязка от электромагнитных наводок, а также становится возможным уменьшить вклад собственной чувствительности фотоприемников в полезный сигнал. Кроме того, такое разделение позволяет вынести фотоприемники за пределы области разрушающего воздействия, если оно присутствует. В качестве фотоприемников в данной работе применялись фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

Основными характеристиками детекторов с ВОС являются временное разрешение и чувствительность. Под временным разрешением понимается ширина на полувысоте отклика детектора на короткий импульс ионизирующего излучения. Под чувствительностью детектора понимается число фотоэлектронов, образовавшихся на фотокатоде ФЭУ в результате единичного взаимодействия нейтрона (фотоэлектронов/нейтрон) или  $\gamma$ -кванта (фотоэлектронов/квант) заданной энергии со

сцинтилляционной частью детектора.

В данной работе проведены численные оценки основных характеристик детектора с ВОС и приведены результаты его экспериментальных исследований.

### Описание конструкции

WLS-световоды изготавливаются из полистирола с добавлением спектросмещающей добавки, концентрация которой определяет их переизлучающие, оптические и радиационно-прочностные характеристики и обеспечивает вероятность поглощения фотонов с длиной волны, которая соответствует максимуму ее спектра поглощения. Необходимым условием применимости WLS-световодов в сцинтилляционных детекторах является перекрытие их спектра поглощения со спектром высвечивания сцинтиллятора. Этому требованию отвечают пластмассовые сцинтилляторы как зарубежных, так и отечественных марок, максимум спектра высвечивания которых находится на уровне  $\sim 430$  нм [1, 2], что хорошо согласуется со спектром поглощения зеленых WLS-световодов Saint-Gobain BCF-92 [2] и Kuraray Y-11 [3]. Максимум спектра высвечивания данных WLS-световодов равен 492 и 476 нм соответственно.

В качестве сцинтиллятора для детектора с ВОС использовался сцинтиллятор в форме параллелепипеда марки ПС-Н3 [1] с размерами  $10 \times 10 \times 30$  см. Сцинтиллятор был размещен в светонепроницаемом пластиковом корпусе (рис. 1).

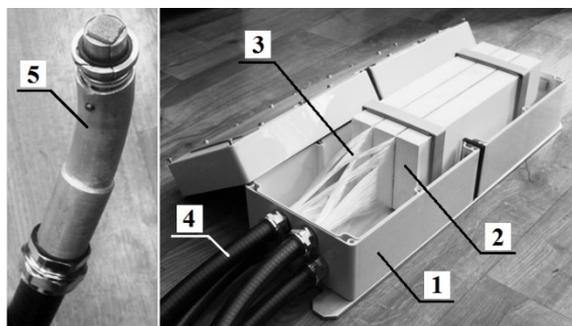


Рис. 1 – Внешний вид детектора с ВОС: 1 – корпус, 2 – сцинтиллятор, 3 – зеленые WLS-световоды, 4 – жгуты WLS-световодов, 5 – наконечник жгута WLS-световодов

Так как процесс поглощения света для дальнейшего спектросмещения происходит через боковые поверхности WLS-световодов, то объем сцинтиллятора был разбит на три равных слоя, в

промежутках между которыми, вплотную друг к другу, в один слой были уложены зеленые WLS-световоды Y-11 квадратного сечения ( $1 \times 1$  мм) и длиной 150 см. При ширине сцинтиллятора 10 см общее число WLS-световодов составило 200 штук. Внешние поверхности сцинтиллятора имели некоторую шероховатость для исключения появления циклических мод и были покрыты белой светоотражающей эмалью для увеличения светосбора. Поверхности сцинтиллятора, примыкающие к световодам, были отполированы. Фотоны, рожденные при высвечивании сцинтиллятора, напрямую или после одного-двух отражений от эмали пересекали сердцевину WLS-световодов, где поглощались спектросмещающей добавкой. Непоглощенные фотоны проходили к следующему слою WLS-световодов, где процесс повторялся. Из свободных концов WLS-световодов было сформировано четыре жгута квадратного сечения, защищенных дополнительной оболочкой от механических повреждений и посторонней засветки. Торцы каждого жгута были отполированы и оформлены наконечником в виде разъемного соединения для стыковки через специальный соединительный фланец с ФЭУ СНФТЗ производства ФГУП «ВНИИА» [4]. В каждом жгуте было размещено 80, 60, 40 и 20 зеленых WLS-световодов. Такое разделение позволяло регулировать чувствительность детектора с ВОС путем соединения с ФЭУ разного количества жгутов.

Процесс переизлучения со спектросмещением в WLS-световодах происходит изотропно и приводит к распространению переизлученных фотонов в обе стороны по ним. Для того чтобы использовать все переизлученные фотоны, надо либо подвести все концы WLS-световодов к ФЭУ, либо приложить свободные концы к зеркальной поверхности для использования отраженной части фотонов. Также, такое естественное деление оптического сигнала можно использовать для организации дублирующего канала.

В описываемом исполнении детектора с ВОС жгуты WLS-световодов имели значительные габариты, ограничивающие возможность их размещения на одном ФЭУ. Свободные концы WLS-световодов были ограничены длиной сцинтиллятора.

### Расчет характеристик

Чувствительность детектора с ВОС зависит от световыхода сцинтиллятора, эффективности светосбора в сцинтилляторе, эффективности за-

хвата фотонов WLS-световодами, потерь в WLS-световодах, вероятности взаимодействия  $\gamma$ -излучения со сцинтиллятором, а также квантовой эффективности фотокатода ФЭУ к длине волны принимаемого сигнала. Для расчета эффективности светосбора  $\varepsilon$  в сцинтилляторе, соответствующей доле фотонов сцинтилляций, попавших в зеленые WLS-световоды от их общего числа, в среде MatLab была написана программа, в основе которой лежит метод Монте-Карло, моделирующий траектории движения каждого фотона сцинтилляции. Расчеты были проведены для пластмассового сцинтиллятора с плотностью  $1,05 \text{ г/см}^3$ , длиной затухания излучения в  $e$  раз равной  $2,5 \text{ м}$ , постоянной затухания импульса высвечивания равной  $2,4 \text{ нс}$  и световыходом  $N_0 = 6000$  фотонов на один  $\gamma$ -квант с энергией  $1,25 \text{ МэВ}$ . Эти характеристики соответствуют сцинтилляторам как отечественных [1], так и зарубежных производителей [2]. Коэффициент отражения света поверхностями сцинтиллятора со светоотражающим покрытием равнялся  $95\%$ . Схема деления сцинтиллятора и укладки WLS-световодов была аналогична описанной в предыдущем разделе. Эффективность захвата фотонов  $K_1$  WLS-световодами квадратного сечения равна  $4,2\%$  [3]. Расчеты показали, что при использовании  $180$  WLS-световодов  $\varepsilon \approx 0,2$  с учетом попадания фотонов сцинтилляций в оба слоя WLS-световодов и изотропного высвечивания спектросмещенных фотонов, приводящего к потере примерно половины передаваемых на ФЭУ фотонов.

Потери фотонов в WLS-световодах зависят от их длины  $L$  и длины ослабления излучения в  $e$  раз  $L_{att}$ . Величина этих потерь выражается через коэффициент  $\chi$  ослабления собственного излучения WLS-световодов формулой

$$\chi = \frac{L_{att}}{L} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{L}{L_{att}}\right) \right)^{1/2} \quad (1)$$

Для WLS-световодов с  $L_{att} = 350 \text{ см}$  [3] и  $L = 150 \text{ см}$  коэффициент  $\chi = 0,82$ .

Расчеты вероятности взаимодействия  $\gamma$ -излучения со сцинтиллятором  $K_2$  в зависимости от толщины последнего были выполнены с помощью программы MCNP5. При расчетах поток  $\gamma$ -квантов был направлен перпендикулярно большей по площади поверхности сцинтиллятора. Энергия гамма-квантов была взята равной  $1,25 \text{ МэВ}$ , что соответствует энергии излучения радиоизотопа  $\text{Co}^{60}$ . Согласно расчетам, вероят-

ность взаимодействия  $\gamma$ -квантов со сцинтиллятором толщиной  $10 \text{ см}$  равна  $47\%$ .

Эффективность  $\mu$  бищелочного фотокатода ФЭУ типа СНТФЗ производства ФГУП «ВНИИА» к излучению с длиной волны  $476 \text{ нм}$ , соответствующей максимуму спектра свечения зеленых WLS-световодов [3], равна  $0,15$  фотоэлектронов/квант [5].

Итак, с учетом вышеперечисленных факторов, чувствительность детектора с БОС к  $\gamma$ -квантам с энергией  $1,25 \text{ МэВ}$  может быть оценена по формуле

$$S_\gamma = N_0 \cdot \varepsilon \cdot K_1 \cdot \chi \cdot K_2 \cdot \mu, \text{ фотоэлектронов/квант.} \quad (2)$$

С учетом площади поверхности сцинтиллятора  $300 \text{ см}^2$ , перпендикулярной потоку  $\gamma$ -квантов, чувствительность детектора с БОС равна  $\sim 1,5 \times 10^{-10} \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^2/\text{квант}$ . Также была оценена чувствительность детектора с БОС с одним зеленым WLS-световодом длиной  $60 \text{ см}$ , уложенным вдоль оси сцинтиллятора, которая составила  $\sim 2,5 \times 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^2/\text{квант}$ .

Стоит отметить, что значение чувствительности может отличаться в худшую сторону вследствие использования менее яркой сцинтилляционной пластмассы, фотокатодов с меньшей чувствительностью, неидеальных WLS-световодов и оптических соединителей, WLS-световодов с меньшей длиной затухания и других неучтенных факторов.

Под временными характеристиками детектора с БОС понимается ширина на полувысоте импульса напряжения или тока в выходной цепи детектора при регистрации импульса ионизирующего излучения. На форму и временные параметры получаемого импульса влияют время высвечивания сцинтиллятора, время светосбора в сцинтилляторе, время высвечивания WLS-световодов, случайность места поглощения фотона в WLS-световоде, а также импульсная характеристика ФЭУ ( $5 \text{ нс}$  на полувысоте импульса для ФЭУ типа СНТФЗ [4]).

Время высвечивания сцинтиллятора определяется длительностью сцинтилляционной вспышки. Как правило, фронт импульса высвечивания фотонов сцинтилляции для быстрых пластмасс существенно меньше  $1 \text{ нс}$  на уровне  $0,1-0,9$  амплитуды [6]. В данной работе этот параметр не учитывается по причине его малости. Спад импульса высвечивания пластмассового сцинтиллятора типа ПС-НЗ [1] равен  $2,4 \text{ нс}$  и может быть интерпретирован как время высвечивания сцинтиллятора.

Прежде чем фотон поглотится в WLS-световоде, он может несколько раз отразиться от стенок сцинтиллятора. При этом влияние на форму импульса оказывают процессы поглощения внутри сцинтиллятора и в стенках. Используя метод Монте-Карло, были получены временные распределения потерь фотонов сцинтилляций с учетом указанных факторов для сцинтиллятора с длиной ослабления излучения в  $e$  раз равной 250 см [1, 2]. Показано, что преобладающими процессами с точки зрения их длительности и количественных характеристик являются поглощение фотонов внутри сцинтиллятора и попадание фотонов в слой WLS-световодов. Характерное время последнего составило  $\sim 11,2$  нс.

Время высвечивания зеленых WLS-световодов лежит в пределах от  $\sim 7$  нс у BCF-92 [2] до 12 нс у Y-11 [3]. Значение временных характеристик WLS-световодов BCF-92 принято равным 7 нс, исходя из результатов экспериментальных исследований с использованием цилиндрического сцинтиллятора диаметром 2 см и высотой 5 см и импульсного рентгеновского аппарата (РА) САРМА-300 с длительностью импульса  $\sim 2,5$  нс. Сцинтиллятор имел сквозное отверстие, проходящее вдоль его оси, внутри которого располагался отрезок WLS-световода длиной около 10 см. При воздействии на сцинтиллятор импульса рентгеновского излучения, образующийся свет передавался по WLS-световоду на ФЭУ СНФТЗ. Ширина на полувысоте зарегистрированного импульса составила величину  $\sim 8,6$  нс. Методом, который заключается в суммировании под квадратным корнем квадратов значений временных характеристик элементов, входящих в состав измерительной схемы, время высвечивания зеленых WLS-световодов BCF-92 получено равным  $\sim 7$  нс.

Значение временных характеристик зеленых WLS-световодов Y-11 принято равным 12 нс, исходя из временных характеристик используемой в них спектросмещающей добавки К-27, исследования которой проводились в работе [7].

Влияние случайности места поглощения фотона в WLS-световоде на временные характеристики детектора в данной работе не учитывается по причине малости длин WLS-световодов (30 см), подвергающихся облучению фотонами сцинтилляций.

В среде MatLab была написана программа, которая с учетом всех вышеизложенных факторов рассчитывает ширину на полувысоте отклика детектора с ВОС на воздействие импульса ионизирующего излучения заданной длительности.

Временное разрешение детектора с ВОС составило  $\sim 17,2$  нс при полном заполнении пространства между частями сцинтиллятора WLS-световодами Y-11 и  $\sim 20,7$  нс при использовании одного зеленого WLS-световода. Расчетным методом в рамках описанной выше модели было показано, что при использовании более быстрых зеленых WLS-световодов BCF-92 временное разрешение детектора с ВОС составляет  $\sim 14,5$  нс.

## Экспериментальные исследования

Для определения основных характеристик детектора с ВОС использовались РА САРМА-300 и поверочная дозиметрическая установка УПГД-2. Электрические импульсы детектора с ВОС регистрировались цифровым осциллографом Tektronix DPO4104B.

Граничная энергия РА САРМА-300 составляет 300 кэВ. На рис. 2 показан типовой импульс излучения РА САРМА-300, полученный с использованием детектора СППД11-04 производства ФГУП "ВНИИА" [4] с чувствительностью  $\sim 10^{-18}$  А·с·см<sup>2</sup>/квант и временным разрешением  $\sim 1,5$  нс, установленного на расстоянии 3 см от мишени РА. Ширина на полувысоте зарегистрированного импульса составила  $\sim 2,5$  нс.

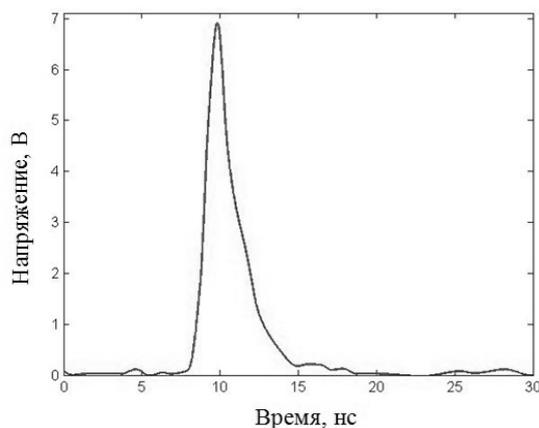


Рис. 2. Типовой импульс излучения РА САРМА-300

Для определения временного разрешения детектора с ВОС была зарегистрирована форма его отклика на воздействие импульса излучения РА САРМА-300. При проведении исследований поле излучения РА САРМА-300 ослаблялось с помощью экрана из свинца. Сцинтиллятор детектора с ВОС был расположен на расстоянии 50 см от мишени РА. Типичная осциллограмма, полученная с использованием детектора с ВОС представлена на рис. 3.

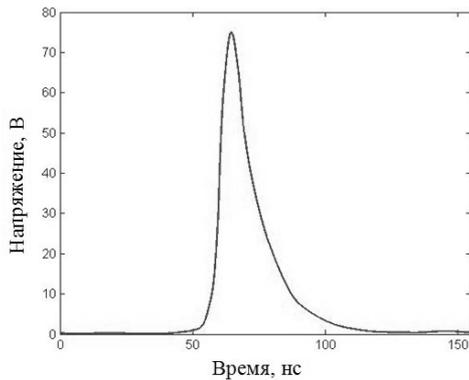


Рис. 3. Импульсная характеристика детектора с ВОС при воздействии импульса излучения РА САРМА-300

Длительность отклика исследуемого детектора на половине высоты составила  $\sim 13,9$  нс с учетом длительности воздействующего импульса на половине высоты  $\sim 2,5$  нс. Эта величина отличается от оценочного значения на 19%. Спад импульса имеет экспоненциальный характер, что определяется доминированием времени высвечивания WLS-световодов. При уменьшении числа WLS-световодов до одного временное разрешение детектора с ВОС равно 16,7 нс.

Детектор с ВОС был отградуирован на установке УПГД-2 (изотоп  $^{60}\text{Co}$  с активностью  $\sim 4,04$  Ки). Чувствительность исследуемого детектора определялась при разных расстояниях между источником и сцинтиллятором, а также при различных коэффициентах ослабления излучения установки. Полученная чувствительность детектора с ВОС к  $\gamma$ -квантам с энергией 1,25 МэВ составила в среднем  $(1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-10}$  А·с·см<sup>2</sup>/квант. Эта величина отличается от оценочного значения на 17%. Во всех проведенных экспериментах использовались три жгута WLS-световодов из четырех с общим количеством WLS-световодов 180 штук, так как конструкция соединительного фланца не позволяла подсоединять четыре жгута одновременно.

Результаты экспериментальных исследований показали, что количество WLS-световодов можно без заметных потерь уменьшить в четыре раза, сохранив эффективность регистрации на прежнем уровне. При уменьшении числа WLS-световодов до одного чувствительность детектора с ВОС составила в среднем  $(2,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-12}$  А·с·см<sup>2</sup>/квант.

### Выводы

В данной работе были описаны основные элементы конструкции детектора с ВОС на основе зеленых WLS-световодов. Было определено, какие

физические параметры и как влияют на чувствительность, а также на форму и временные параметры электрического импульса, получаемого с использованием детектора с ВОС. Экспериментальные исследования показали, что реализованный принцип построения детектора дает возможность эффективного светосбора с больших площадей сцинтилляторов и регистрации формы импульса ионизирующего излучения в токовом режиме.

Проведены оценочные расчеты чувствительности детектора с ВОС к  $\gamma$ -излучению с энергией 1,25 МэВ и его временного разрешения. Также представлены результаты экспериментальных исследований характеристик детектора с ВОС. Проведенные исследования позволяют говорить о совпадении расчетных и экспериментальных характеристик детектора с ВОС с точностью, в среднем, 18%.

Максимальная полученная чувствительность детектора с ВОС к  $\gamma$ -квантам с энергией 1,25 МэВ составила  $\sim 1,2 \cdot 10^{-10}$  А·с·см<sup>2</sup>/квант. Временное разрешение детектора с ВОС составило  $\sim 14$  нс. Расчетным методом показано, что при использовании более быстрых зеленых WLS-световодов Saint-Gobain BCF-92 значение временного разрешения детектора с ВОС может быть уменьшено до  $\sim 11,7$  нс.

Также было экспериментально показано, что передача оптического излучения сцинтиллятора на ФЭУ и регистрации формы импульса ионизирующего излучения в токовом режиме может быть осуществлена посредством одного зеленого WLS-световода. При этом чувствительность детектора с ВОС к  $\gamma$ -квантам равна  $\sim 2 \cdot 10^{-12}$  А·с·см<sup>2</sup>/квант, а временное разрешение  $\sim 17$  нс.

### Список литературы

1. [http://www.iftp.ru/uploads/docs/our\\_production.pdf](http://www.iftp.ru/uploads/docs/our_production.pdf).
2. <http://www.detectors.saint-gobain.com>.
3. <http://www.kuraraypsf.jp>.
4. <http://www.vniia.ru/vakum/vakum.html>.
5. Соболева Н. А., Меламид А. Е. Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1974.
6. Mukphy T.T., etc. Neutron time-of-flight and Emission time diagnostics for the WIF // Rev. of scient. Instrum. 2001. Vol. 72-1.
7. Pla-Dalmau A., Foster G.W., Zhang G. Final Results from SDC Dopant Search for New Green Wavelength Shifting (WLS) Fibers // Fermi National Accelerator Laboratory. 1993. Vol. 1.