



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**  
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2023–15

В.В. Бреховских, А.М. Горин, В.А. Дятченко, С.В. Евдокимов,  
А.А. Зайцев\*, В.И. Изучеев, М.В. Медынский, В.И. Рыкалин,  
С.А. Садовский, А.А. Шангараев

**Применение тонких сцинтилляционных счётчиков в  
детекторах частиц**

Направлено в *ПТЭ*

---

\*ОИЯИ, Дубна, Россия

Протвино 2023

**Аннотация**

Бреховских В.В. и др. Применение тонких сцинтилляционных счётчиков в детекторах: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2023–15. – Протвино, 2023. – 20 с., 16 рис., 1 табл., библиогр.: 19.

В работе рассматриваются конструкции и характеристики тонких сцинтилляционных счётчиков, толщиной не более нескольких мм, с большой геометрической апертурой. Такие счетчики с высоким световыходом и, соответственно, с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц находят широкое применение в ядерной физике и физике элементарных частиц, а также в установках контроля бета загрязнений одежды и различных предметов посредством выделения сигналов от низкоэнергетичных электронов на фоне гамма излучения. В этих применениях именно минимальная толщина сцинтиллятора при необходимых больших геометрических размерах детектора определяет высокую эффективность счетчиков в указанных экспериментах и установках контроля бета загрязнений.

**Abstract**

Brekhovskikh V.V. et al. Thin Scintillation Counters in Particle Detectors: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2023–15. – Protvino, 2023. – p. 20, fig. 16, tables 1, refs.: 19.

The paper deals with the design and characteristics of thin scintillation counters, not more than several mm thick, with a large geometric aperture. Such counters with high light output and, consequently, with high efficiency of charged particles registration are widely used in nuclear and particle physics, as well as in systems for control of beta contamination of clothes and various objects by signal extraction from low-energy electrons on the background of gamma radiation. In these applications, it is the minimum scintillator thickness with the necessary large geometric dimensions of the detector that specify the high efficiency of the counters in these experiments and beta contamination control devices.

## 1. Введение

Тонкие сцинтилляционные счетчики с характерной толщиной не более нескольких мм и большой геометрической апертурой находят широкое применение в ядерной физике и физике промежуточных энергий. Такие счетчики используются в физических экспериментах, в основном, в качестве пучковых и различного типа вето-счетчиков заряженных частиц. Это позволяет при сохранении высокой эффективности регистрации заряженных частиц минимизировать фоны, возникающие при прохождении через сцинтилляторы и световоды счетчиков интенсивных потоков частиц, взаимодействующих с веществом счетчиков.

Конструктивно тонкие счётчики можно разделить на 2 типа: состоящие из сцинтилляционной пластины, сочлененной с фотоприемником, и с использованием вывода излучения из сцинтилляционных пластин с помощью спектросмещающих (WLS) волокон. В качестве фотодетекторов обычно используются вакуумные или полупроводниковые ФЭУ. Необходимость применения тонких счётчиков можно показать на примере нескольких экспериментов в области промежуточных энергий.

В экспериментах по исследованию редких распадов  $K^+$  мезонов на установке ОКА [1] используется пучок вторичных частиц с импульсом 17,7 ГэВ/с и интенсивностью вплоть до  $3 \times 10^6$  частиц/сек, обогащённый каонами. Для получения триггера на прохождение каонов крайне необходимо сделать триггерные счётчики как можно тоньше, чтобы, во-первых, не возникал фон от взаимодействия пучковых частиц в этих счетчиках и, во-вторых, чтобы минимизировать многократное рассеяние, которое приводит к ухудшению точности измерения треков частиц и их импульсов. Для этого на установке используются триггерные счётчики толщиной 1 мм.

В эксперименте Гиперон-М [2] на серии ядер (Be, C, Al, Cu, Sn, Pb) проводятся прецизионные измерения масс лёгких мезонов, образующихся в пион-ядерных взаимодействиях и распадающихся в конечном счете на фотоны. При этом толщина тяжелых мишеней (Cu, Sn, Pb) не может быть больше нескольких мм из-за конверсии фотонов в веществе этих мишеней. Это, в свою очередь, накладывает жесткие ограничения на толщину триггерного счетчика, расположенного непосредственно перед мишенью и определяющего сам факт прохождения пучковой частицы через мишень установки. Поэтому для успешного проведения эксперимента минимально возможная толщина этого счётчика является принципиальной, так как это приводит к уменьшению фона от взаимодействий пучковых частиц с этим счётчиком. При этом оказалось также недопустимым и наличие у этого счётчика пластмассового световода для сопряжения с фотоумножителем из-за черенковского излучением, возникающего в световоде при прохождении через него пучковых частиц. Все это в целом предъявляет достаточно жесткие требования к характеристикам и конструкции счетчика.

Аналогичные требования к толщине триггерных сцинтилляционных счетчиков при сохранении высокой эффективности регистрации заряженных частиц предъявляются и в эксперименте Гиперон+ [3], [4], [5]. Это касается, прежде всего, мишенного счетчика, регистрирующего прохождение пучковой частицы через мишень, и счетчиков вето-детектора заряженных частиц установки. Требования обостряются достаточно плотной компоновкой этих счетчиков в составе мишенного узла установки, показанного ниже на рис. 7.

Тонкие сцинтилляционные счетчики с высокой эффективностью регистрации заряженных частиц находят широкое применение и в прикладных задачах. Мы остановимся здесь, для примера, на практическом применении таких счётчиков в установках для контроля бета загрязнений, где именно минимальная толщина сцинтиллятора при необходимых размерах детектора определяет уровень гамма режекции и, соответственно, сепарации электронов счётчиком и его эффективность, то есть, в конечном счете, определяет качество установки для контроля бета загрязнений.

## **2. Тонкие счётчики на основе вакуумных ФЭУ**

### **2.1. Пучковые мониторные счётчики на установке ОКА**

Нет особых проблем изготовить тонкий сцинтилляционный счётчик даже толщиной в доли мм, когда необходимая площадь сцинтилляционной пластины составляет десятки см<sup>2</sup>.

Проблемы начинаются, когда эта площадь составляет сотни см<sup>2</sup>. При таких площадях пластин, неизбежно возникают потери света при сочленении с помощью световодов торцов пластин с плоскими окнами фотокатодов обычных вакуумных ФЭУ. Применение адиабатических световодов, обеспечивающих относительно небольшие потери света, затрудняется сложностью и трудоемкостью их изготовления и стыковки со сцинтиллятором и фотокатодом ФЭУ, а также громоздкостью этих световодов. Эффективным в этом случае оказалось решение на основе применения разработанного в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ фотоумножителя ФЭУ-КС [6], который представляет собой стеклянную колбу диаметром 40 мм с бищелочным фотокатодом размерами 15×200 мм<sup>2</sup>, 10-диодной умножительной системой длиной 200 мм и одним или двумя протяженными анодами, рис. 1.



Рис. 1. Фотоумножитель ФЭУ-КС.

Такая конструкция фотоумножителя позволяет существенно упростить узел сочленения сцинтиллятора с окном фотокатода за счёт исключения использования световода. Это значительно улучшает эффективность сбора сцинтилляционного излучения на фотокатод ФЭУ. Чувствительность фотокатода ФЭУ-КС составляет около  $70 \div 80$  мА/Вт. Величина усиления диодной системы находится в пределах  $2 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$ . На рис. 2 представлен общий вид детектора на основе ФЭУ КС с пристыкованной к фотокатодному окну на оптическом контакте сцинтилляционной пластиной с размерами  $1 \times 200 \times 300$  мм<sup>3</sup>.



Рис. 2. Фото общего вида тонкого сцинтилляционного счётчика с размерами рабочей области сцинтиллятора  $1 \times 200 \times 300$  мм<sup>3</sup>.

Измеренное количество фотоэлектронов, регистрируемое счётчиком при прохождении минимально ионизирующих частиц (МИР) через удалённую от фотокатода область сцинтиллятора, составляет 20 фотоэлектронов, что соответствует величине световыхода около 100 фотоэлектронов на один МэВ (фэ/МэВ) выделенной в сцинтилляторе энергии. Именно такие счётчики с необходимыми размерами сцинтилляторов используются в качестве мониторинговых в эксперименте ОКА уже более 10 лет.

## **2.2. Тонкий сцинтилляционный счётчик установки Гиперон-М**

Как уже отмечалось выше, с целью оптимизации условий проведения эксперимента Гиперон-М для выделения пучковых частиц, проходящих через мишень, был использован счётчик с минимально возможной толщиной сцинтиллятора. Общий вид счётчика представлен на рис. 3.

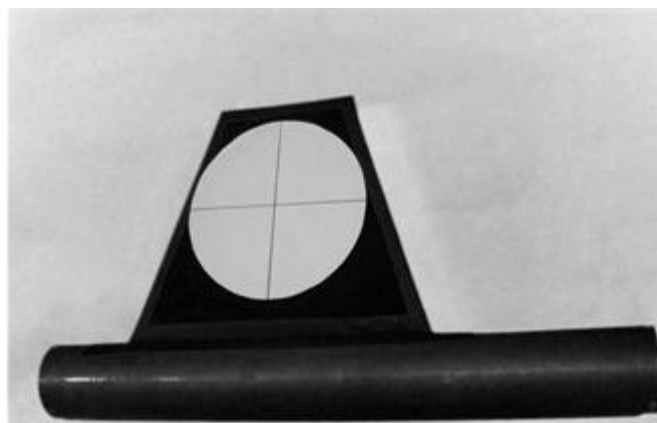


Рис. 3. Общий вид тонкого счётчика, расположенного перед мишенью установки Гиперон-М.

В счётчике используется ФЭУ-КС и круглая сцинтилляционная пластина диаметром 120 мм и толщиной 0,5 мм, подвешенная на высоте 28 мм над окном фотокатода с помощью трёх нитей. Сцинтиллятор размещён внутри трапециевидного кожуха, закреплённого на цилиндрическом корпусе ФЭУ-КС. Кожух обклеен внутри алюминизированным лавсаном с высоким  $\geq 80\%$  коэффициентом отражения и представляет собой воздушный световод, собирающий свет на фотокатод благодаря плавному сужению размеров кожуха по высоте и толщине с удалением от фотокатода. Положение сцинтиллятора внутри кожуха обозначено белым кругом. Количество фотоэлектронов от МИР, проходящих через наиболее удалённую от фотокатода область сцинтиллятора составляет 15 фэ, что соответствует световыходу около 150 фэ/МэВ.

### 2.3. Детектор загрязнений на основе ФЭУ-КС

Высокий световыход счётчиков на основе ФЭУ-КС, превышающий 100 фэ/МэВ при достаточно больших размерах сцинтилляторов и толщинах менее 1 мм, делает потенциально привлекательным их использование в качестве детекторов бета загрязнений. По требованиям МЭК 61098 [7] размеры рабочих площадей детекторов для контроля загрязнений источниками бета излучений должны составлять не менее  $120 \times 200 \text{ мм}^2$  для контроля ладоней рук и не менее  $150 \times 350 \text{ мм}^2$  для контроля ступней ног. Одним из важных является требование, чтобы при приближении к плоскости детектора на расстояние 10 мм источника бета-излучения типа 4СО-212 скорость счета на выходе детектора увеличивалась не менее чем в 5 раз. Как было показано ранее в нашей работе [8], тонкие счётчики на ФЭУ-КС вполне удовлетворяют как требованию по размерам рабочих площадей, так и остальным требованиям МЭК 61098. На рис. 4 показан такой детектор, предназначенный для обнаружения бета загрязнений рук. Он состоит из двух отдельных тонких счетчиков, которые обращены друг к другу тонкими светонепроницаемыми окнами, изготовленными из светозащитной пленки толщиной 50 мкм. Сцинтилляционная пластина установлена на окне фотокатода с оптическим контактом при помощи прозрачной силиконовой прокладки, изготовленной из компаунда СИЭЛ [9]. На рис. 5, 6 показано, что сцинтилляционная пластина прижимается к прокладке с помощью «домика» - отражателя из алюминизированного лавсана, обеспечивающего дополнительный сбор света, выходящего через фронтальные стенки сцинтиллятора. Световыходы обоих счётчиков составляют около 110 фэ/МэВ.

Счетчики помещены в корпуса из черного непрозрачного пластика (поливинилацеталь) толщиной в несколько мм. Габаритные размеры корпуса –  $360 \times 80 \times 225 \text{ мм}^3$ . Размеры рабочего окна детектора –  $200 \times 150 \text{ мм}^2$ . Расстояние внутри корпуса от пластины сцинтиллятора до рабочего окна примерно 1 см. Рабочее положение опытного образца детектора – вертикальное (для измерения загрязнения правой или левой руки).



Рис. 4. Фото проведения измерения бета загрязнений с помощью детектора.

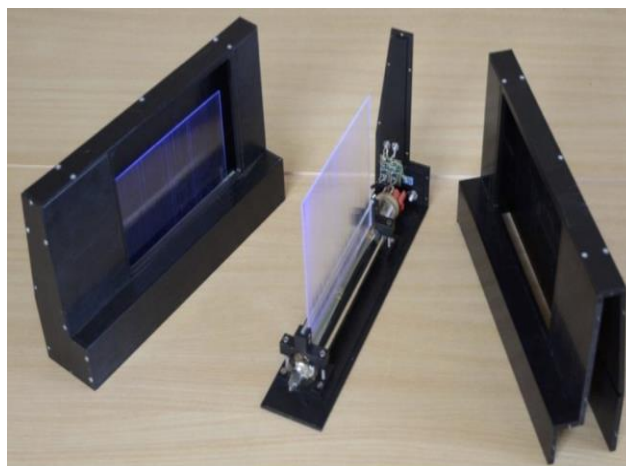


Рис. 5. Вид счётчиков детектора: сняты светозащитные пленки отражатели левого и правого счетчиков; правый счетчик вынут из корпуса.

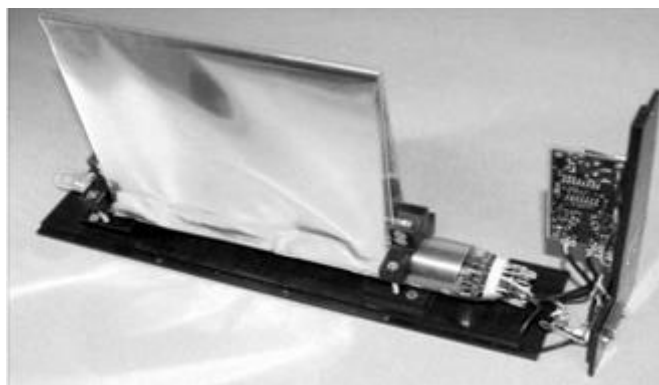


Рис. 6. Вид счетчика детекторов бета загрязнений с «домиком» - отражателем из алюминизированного лавсана.

Детекторы этого типа по таким основным параметрам детекторов бета загрязнений, как толщина сцинтилляционной пластины (1мм) и световыход (более 100 фэ/МэВ), остаются по настоящее время одними из лучших.

### **3. Тонкие счётчики для физических исследований с использованием спектросмещающих волокон и полупроводниковых ФЭУ**

#### **3.1. Развитие методики вывода излучения из сцинтилляторов и его регистрации с помощью WLS и фотодетекторов**

В последнее десятилетие наблюдается активное внедрение в практику физического эксперимента методики использования “бюджетных” сцинтилляторов и вывода излучения из



них с помощью WLS волокон. Такие недорогие сцинтилляторы, имеющие стоимость в несколько раз меньшую, чем полимеризованные, в основном, производятся из опудренных сцинтилляционными добавками полистирольных гранул. Для изготовления сцинтилляторов применяются технологии экструдирования, литья под давлением и плавления опудренных сцинтилляционными добавками гранул в формах с зеркальными стенками [10]. Целый ряд экспериментальных физических установок оснащён экструдированными сцинтилляторами, о масштабах производства которых можно судить по количеству в 100 000 штук используемых только в эксперименте МИНОС [11] сцинтилляционных полос с размерами поперечного сечения  $10 \times 41 \text{ мм}^2$ , длиной 8 м и канавкой на широкой грани полосы для укладки в неё одного WLS волокна. По этой технологии возможно изготовление с высокой производительностью сцинтилляционных полос толщиной от 10 мм до долей мм.

Производительность современных литьевых машин соответствует двухминутному рабочему циклу, что позволяет изготавливать огромное количество сцинтилляционных пластин с максимальной толщиной в несколько мм. Так, для адронного калориметра установки АТЛАС [12] изготовлено около 460 000 пластин различной формы. Ещё большее количество сцинтилляционных пластин различных размеров было изготовлено для модулей электромагнитных калориметров типа “Шашлык”, например, в эксперименте PHENIX [13] общее количество пластин составляло более 933 000. В этих детекторах каждая пластина вместе с проходящими через неё WLS волокнами, по сути, является тонким счётчиком. Подобные пластины нашли широкое применение и для изготовления многочисленных отдельных тонких счётчиков с WLS и полупроводниковыми фотоумножителями (SiPM) в качестве фотодетекторов.

Технология плавления гранул в формах с зеркальными стенками заключается в плавлении опудренных гранул в формах в атмосфере нейтрального газа. Эта технология является более универсальной, но менее производительной, чем экструдирование и литьё под давлением. Например, методом плавления на действующем в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ оборудовании можно изготавливать в сутки 6 сцинтилляционных пластин толщиной от 1 мм до 50 мм при габаритах до  $500 \times 1000 \text{ мм}^2$  и одновременно 6 полос (стрипов) с размерами до  $50 \times 100 \times 2600 \text{ мм}^3$ . На этом оборудовании было изготовлено несколько тысяч стрипов и сцинтилляторов с размерами  $50 \times 500 \times 500 \text{ мм}^3$ . По указанной технологии были изготовлены и сцинтилляторы тонких счётчиков, описанных ниже в разделе 3.2, и тонкие счётчики для детекторов бета загрязнений, рассматриваемые в разделе 4.

### 3.2. Тонкие счётчики для охранной системы детектора эксперимента Гиперон+

Установка Гиперон+ [3] предназначена для изучения адрон-ядерных взаимодействий, в результате которых образуются вторичные ядра в различных возбужденных состояниях. Идентификация уровней возбуждения осуществляется путем измерения энергий последующих гамма-переходов девозбуждения методами прецизионной ядерной гамма-спектроскопии. Детектор гамма-ядерных переходов представляет собой систему из трех колец сцинтилляционных счетчиков (по шесть счетчиков в кольце) на основе кристаллов NaI и BGO. В центре детектора расположена ядерная мишень. Чтобы подавить фон от заряженных частиц, попадающих в кристаллы счетчиков наряду с фотонами гамма-переходов, ближние к мишени торцы этих счетчиков перекрыты шестью продольными сцинтилляционными счётчиками вето-детектора заряженных частиц, основное требование к которым — высокая эффективность регистрации заряженных частиц. Гамма-счетчики и счетчики вето-детектора вместе с мишенью образуют мишенный узел установки Гиперон+, показанный на рис. 7.



Рис. 7. Общий вид мишенного узла установки Гиперон+ на 18 канале У-70, красным цветом показаны продольные счётчики вето-детектора заряженных частиц. Черные тубусы – сцинтилляционные счетчики на основе кристаллов NaI и BGO. Внизу видна панель с усилителями для SiPM.

Продольный сцинтилляционный счётчик вето-детектора представляет собой светоизолированную сцинтилляционную полистирольную пластину с размерами  $3,5 \times 86 \times 309$  мм<sup>3</sup>, содержащую стандартные добавки (2% РТР + 0,05% РОРОР). В канавки на её поверхности вклеены WLS волокна, торцы которых собраны и вклеены в жгут с поперечным сечением  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>. Отфрезерованный торец бандла соединяется с SiPM, фоточувствительная область которого также имеет размеры  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>. Выходные сигналы SiPM через тонкий ( $\varnothing 2$  мм) коаксиальный кабель длиной 1 м поступают на усилители, см. рис. 7 (внизу). На рис. 8 показан продольный тонкий счётчик без светоизолирующей бумажной и светоотражающей (Тайвек) обёрток, а на рис. 9 – счётчик в сборе вместе с встроенным SiPM.

По измерениям на МIP (космические мюоны) световыход счётчиков составляет не менее 55 фэ или 87 фэ/МэВ. Неоднородность светосбора по площади счётчиков, измеренная с помощью радиоактивного источника <sup>90</sup>Sr, составляет  $\pm 20\%$ .

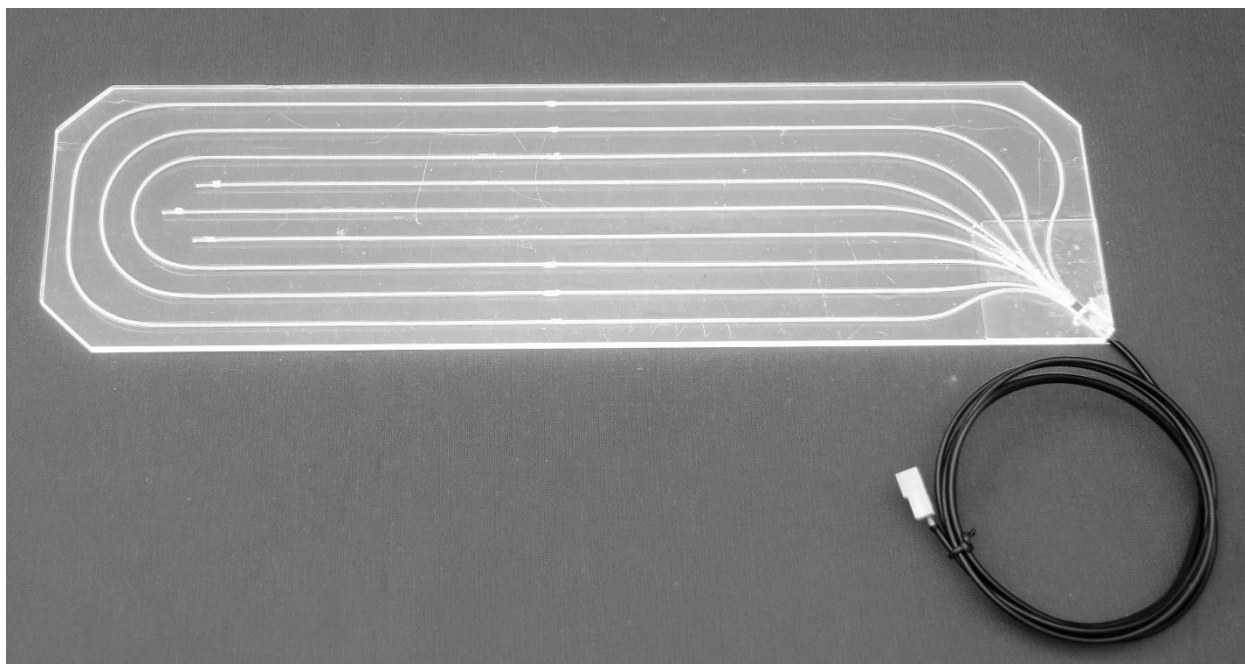


Рис. 8. Фото продольного тонкого счётчика вето-детектора без светоизолирующей бумажной и светоотражающей (Тайвек) обёрток.

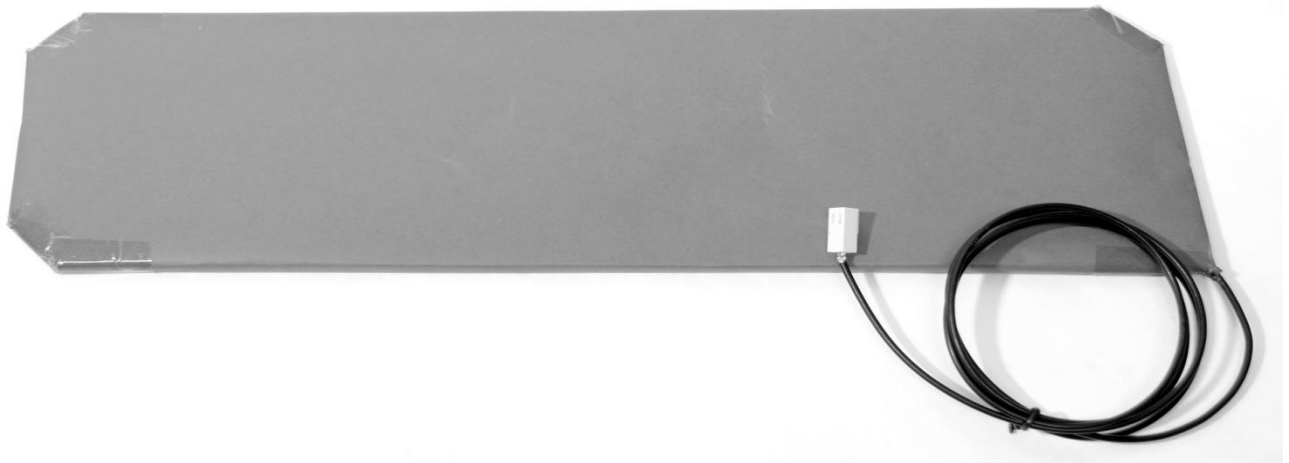


Рис. 9. Фото продольного тонкого счётчика вето-детектора в сборе.

В случае использования сцинтилляционных счётчиков на основе WLS и SiPM в экспериментах на интенсивных пучках частиц [1] остаётся неясным, до каких интенсивностей счётчики могут регистрировать частицы. Измерения, проведённые при возбуждении сцинтиллятора описанного выше продольного тонкого счётчика импульсами ультрафиолетового света, подтвердили данные [14] о высоком быстродействии фотодетекторов при использовании “быстрого” вывода сигнала от SiPM – предельная частота световых импульсов счётчика, при которой начинается быстрое падение амплитуды сигналов, составляет около 20 МГц.

#### **4. Тонкие счётчики детекторов бета загрязнений с использованием спектросмещающих волокон и полупроводниковых ФЭУ**

Широкое распространение в последние десятилетия методики вывода излучения сцинтилляторов спектросмещающими (WLS) волокнами и его регистрации с помощью кремниевых ФЭУ (SiPM) привели к разработкам тонких счётчиков на этих элементах, в том числе и для детекторов бета загрязнений [15]. Ниже обсуждаются конструкции и характеристики тонких счётчиков для детекторов бета загрязнений ног и рук, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

##### **4.1. Конструкция счётчиков**

Конструктивно счётчик детектора загрязнений рук или ног представляет собой светоизолированную коробку из черного поливинилацетата с тонким входным окном, состоящим из светоотражающей алюминизированной лавсановой плёнки толщиной 12 мкм и свтозащитной плёнки толщиной 15 мкм. В коробке находится тонкая сцинтилляционная

пластина с размерами  $2,5 \times 140 \times 210$  или  $2,5 \times 170 \times 320$  мм<sup>3</sup> для детекторов загрязнений рук и ног соответственно. Пластина изготовлена из полистирольного сцинтиллятора со стандартными добавками (2% РТР + 0,05% РОРОР). Светосбор осуществляется с помощью 9 петель WLS волокон типа Y11 (производство фирмы Kuraray, Япония [16]) диаметром 1 мм, вклеенных в канавки в сцинтилляционной пластине и двух SiPM (типа MicroFC-30035-SMT производства фирмы SensL, Ирландия [14]). Обратная сторона пластины соединена с диффузным отражателем – листом Тайвека толщиной 0,2 мм. Концы волокон объединяются в 2 жгута, которые с оптическим контактом пристыковываются к SiPM. Сигналы SiPM подаются на встроенный электронный модуль, состоящий из усилителей-формирователей, схемы совпадений с разрешением 30 нс и формирователя выходного ТТЛ сигнала длительностью 200 нс. Общие виды счётчика представлены на рис. 10 и рис. 11.



Рис. 10. Фото общего вида счётчика без светоотражающей и светозащитной обёрток: сцинтилляционная пластина с WLS волокнами, двумя SiPM, к которым присоединены торцы волокон и электронным модулем.



Рис. 11. Фото общего вида счётчика в сборе.

Следует отметить, что необходимость использования схемы совпадений сигналов SiPM связана с большой скоростью счёта темновых (шумовых) импульсов. На рис. 12 показаны зависимости скорости счёта отдельного SiPM и SiPM в составе счётчика от порога дискриминации формирователя. Калибровка каналов АЦП в фотоэлектронах описана ниже.

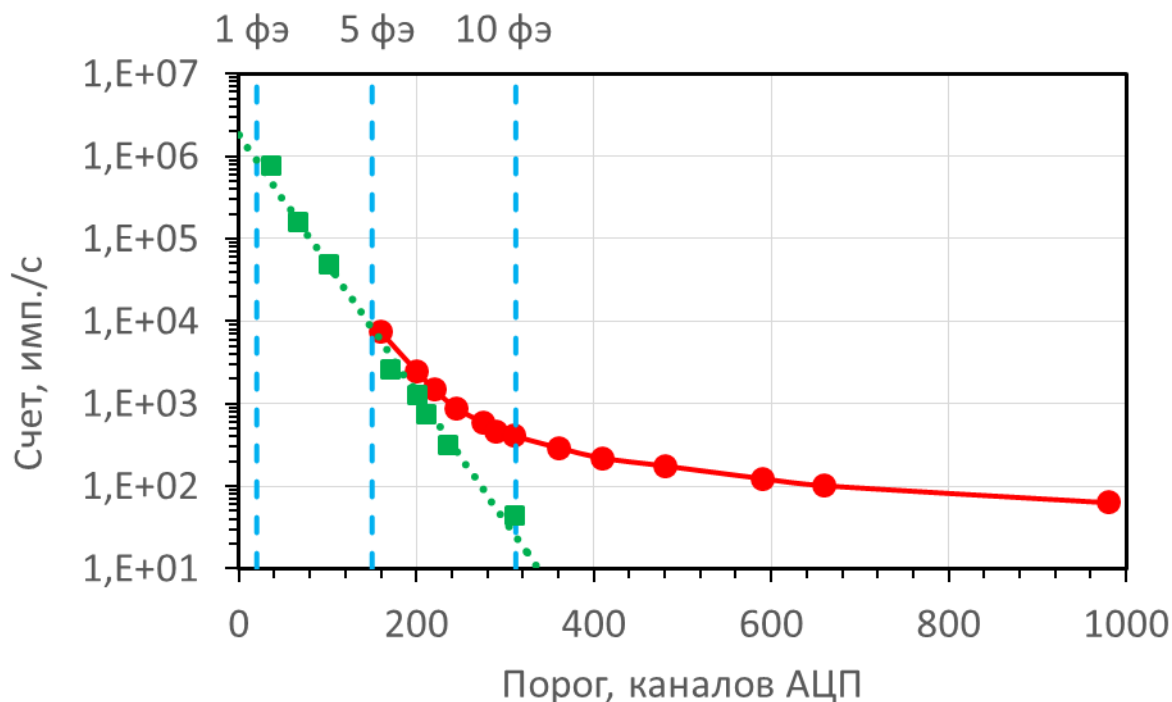


Рис. 12. Скорость счёта (при напряжении смещения 30.5 В) в зависимости от порога дискриминации формирователей: линия с крупными точками – счёт шумов и естественного радиоактивного фона счетчика с размерами 50×500×500 мм<sup>3</sup>, с использованием WLS и одного SiPM, с квадратными маркерами – собственный шумовой счет изолированного SiPM.

Отметим, что при использовании схемы совпадений на каждый из двух используемых SiPM поступает только половина излучения, собираемого WLS волокнами. Поэтому пороги формирователей сигналов от каждого SiPM соотносятся с соответствующей половиной общего светового сигнала, что приводит к падению отношения сигнал/тепловой шум SiPM. Однако при порогах регистрации около 3 фэ и шумовом счете каждого канала регистрации порядка 30 000 импульсов/с схема совпадений позволяет существенно подавить шумы – примерно в 200 раз.

#### 4.2. Изучение характеристик счётчиков детекторов бета загрязнений

Рассматриваемые счётчики бета загрязнений рук и ног отличаются как по длине, так и по ширине сцинтилляционных пластин, что приводит при одинаковом числе петель использованных WLS волокон к несколько большему световыходу в случае детекторов для рук. Поэтому далее мы будем рассматривать детекторы загрязнений для ног, тем более что последние были изучены на большой статистике.

Среднее количество фотоэлектронов  $\bar{n}_{\text{фэ}}$ , регистрируемых при прохождении частиц через сцинтиллятор счётчика, определялось как отношение наиболее вероятной величины зарядов сигналов в измеренных спектрах к заряду однофотоэлектронного импульса. Калибровка каналов АЦП в фотоэлектронах (определение числа каналов, соответствующих такому импульсу) производилась при малом количестве фотоэлектронов, регистрируемых SiPM при возбуждении сцинтилляционной пластины счётчика импульсами ультрафиолетового излучения светодиода, Калибровочный спектр приведён на рис. 13. По указанной калибровке один фотоэлектрон соответствует 1,66 каналам АЦП. Указанные выше измерения проводились с помощью многофункционального осциллографа типа LeCroy Wave Runner 606 Zi 600 MHz.

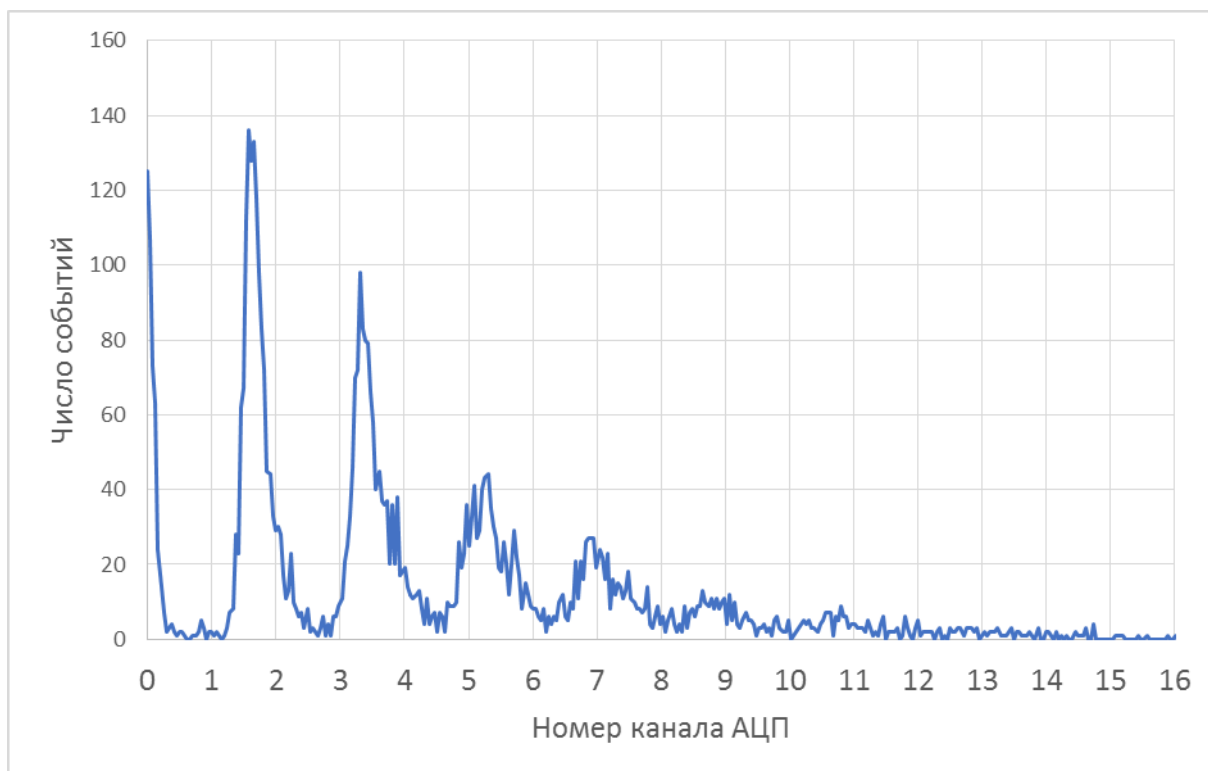


Рис. 13. Калибровочный спектр при малом количестве фотоэлектронов. Левый пик в спектре соответствует пьедесталу, последующие — импульсам однофотоэлектронных сигналов, двухфотоэлектронных и так далее.

В рамках настоящей работы были изучены характеристики четырёх счётчиков бета загрязнений. Для трёх из них (счётчики 1-3) были измерены световыходы при регистрации МПР и электронов радиоактивного источника  $^{207}\text{Bi}$ , а для четвёртого – счётчик 4 (расчётная модель) получена оценка указанных световыходов на основании сравнения световыходов от МПР исходных (без WLS волокон) сцинтилляционных пластин счётчиков.

На рис. 14 приведен суммарный спектр сигналов SiPM счетчика № 2 при регистрации электронов  $^{207}\text{Bi}$ . Следует отметить, что пересечение аппроксимации линейной части правого склона этого спектра с энергетической осью (каналы АЦП) соответствует наиболее интенсивной линии электронов распада  $^{207}\text{Bi}$  с максимальной энергией 975 кэВ [17] и 154 фотоэлектронам согласно калибровочному спектру. Действительно, при установке пластмассового (плексиглас) фильтра толщиной 1мм между этим источником и детектором загрязнений правый склон спектра значительно сдвигается в сторону меньших энергий (Рис. 15), что может быть связано только с поглощением фильтром части энергии электронов, но не с гамма-квантами.

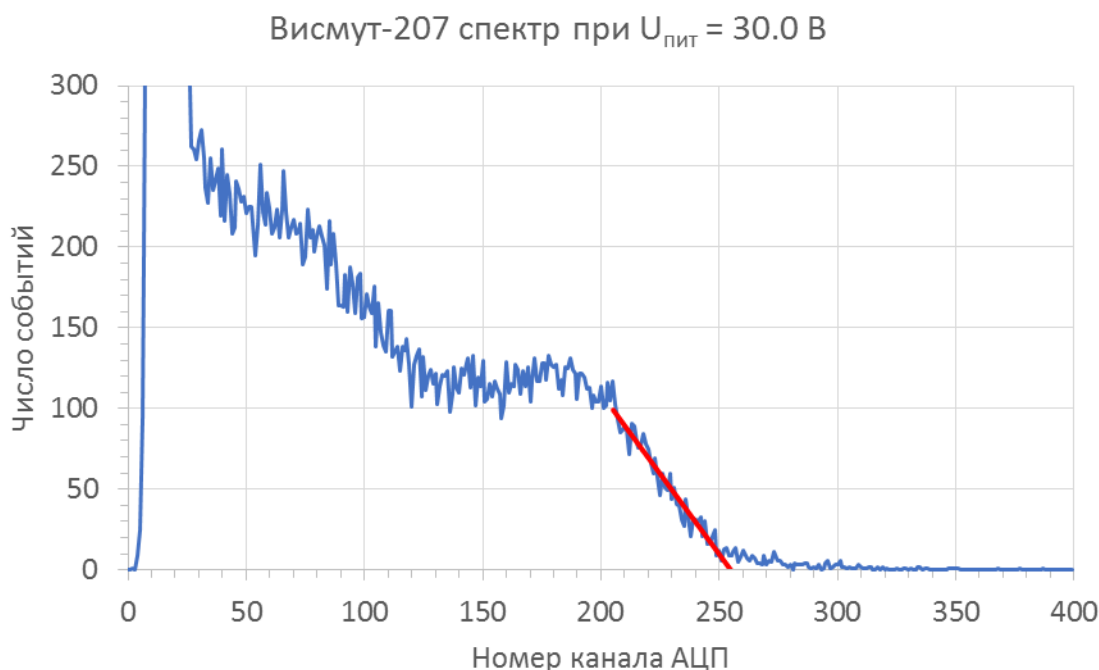


Рис. 14. Амплитудный спектр суммы сигналов обоих SiPM счетчика № 2 при регистрации излучения от источника  $^{207}\text{Bi}$ .





Рис. 15. Амплитудный спектр суммы сигналов обоих SiPM при регистрации излучения от источника  $^{207}\text{Bi}$  с пластмассовым фильтром толщиной 1 мм.

Использование в рассматриваемых детекторах загрязнений “стандартного” вывода сигнала от SiPM позволяет получить более высокое спектрометрическое разрешение по сравнению с использованием “быстрого вывода” [14]. Испытания счетчиков, проведенные при их возбуждении ультрафиолетовыми световыми импульсами, генерирующими сигналы со средним числом фотоэлектронов  $\bar{n}_{\text{фэ}} = 20$ , показали, что нагрузочная способность счетчиков составляет около одного МГц.

По стандарту МЭК [7], параграф 7.1.3.2, однородность отклика детектора по его рабочей площади измеряется с помощью небольшого бета источника в каждой из 44 фиксированных МЭК координат. Влияние окружающего фона вычитается из каждого измерения (счёт – фон). Наибольшее отличие от среднего значения не должно превышать коэффициента 2. В нашем случае однородность отклика измерялась с помощью источника  $^{207}\text{Bi}$  с диаметром рабочей площади 5 мм и активностью 11 000 Бк с максимальной энергией электронов около 1 МэВ. Наибольшее отклонение отклика от средней величины не превысило  $\pm 15\%$ .

При использовании  $^{207}\text{Bi}$  как реперного источника электронов с максимальной энергией 975 кэВ были определены ожидаемые величины эффективности регистрации счётчиком 1 электронов с фиксированной энергией. Для этого после калибровки шкалы

каналов в кэВ и, соответственно, в фотоэлектронах (энергия в 975 кэВ, что соответствует  $\bar{n}_{\text{фэ}} = 45$  для каждого SiPM, измерялись эффективности регистрации импульсов УФ светодиода, соответствующие по числу фотоэлектронов электронам с различной энергией (рис. 16, квадратные маркеры). Измерения эффективности регистрации проводились при порогах формирователей сигналов SiPM, соответствующих  $n = 3\text{фэ}$ . С целью прогнозирования зависимости эффективности регистрации электронов от световых выходов сцинтилляционных пластин с помощью распределения Пуассона были рассчитаны зависимости вероятности событий с  $n \geq 3\text{фэ}$  для средних чисел фотоэлектронов, регистрируемых каждым SiPM в счётчиках 1-4 и равных 45, 77, 97, 142 соответственно. Указанные зависимости с возведенными в квадрат значениями вероятности событий для каждого числа фотоэлектронов  $\bar{n}_{\text{фэ}}$  моделируют работу детектора загрязнений с использованием схемы совпадений. Они показаны на рис.16 соответственно сплошной, проходящей через экспериментальные точки, сплошной, пунктирной и точечной линиями.

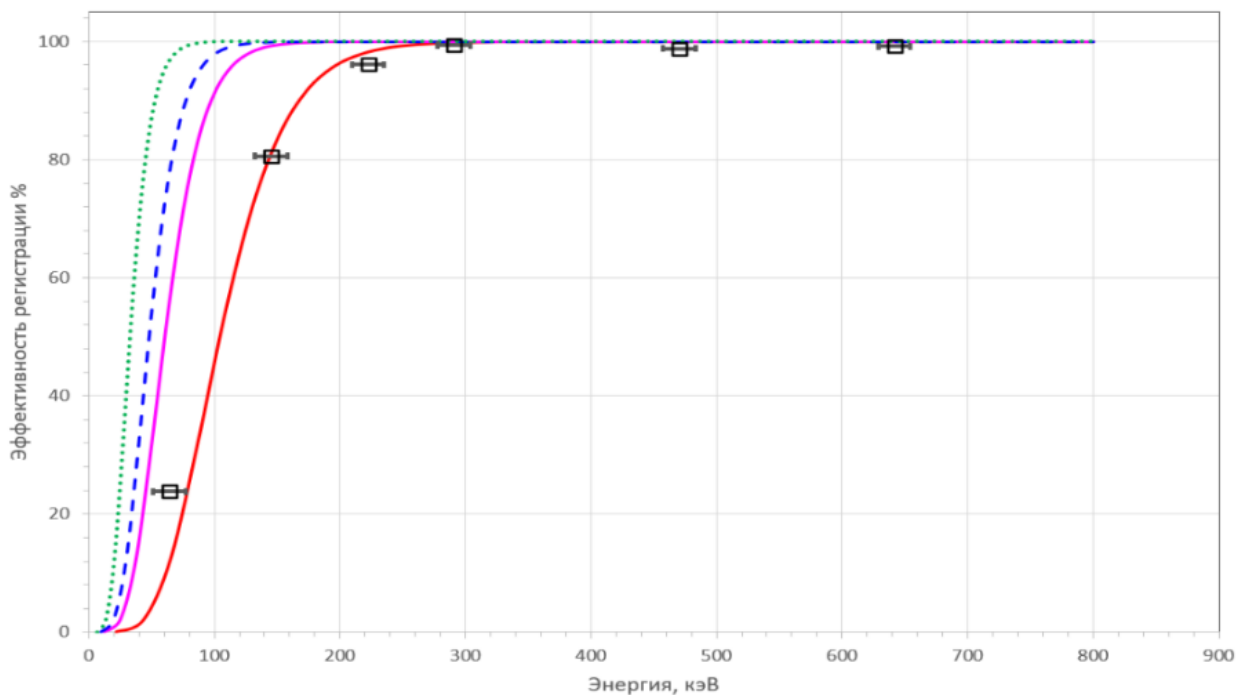


Рис. 16. Зависимости эффективности регистрации электронов от их энергии при значениях напряжения смещения SiPM 30В: квадратные маркеры – результаты измерений эффективности счётчика загрязнений. Соответственно, точечная, пунктирная, сплошная и сплошная, проходящая через экспериментальные точки линии, – расчетные результаты вероятности событий с  $n_{\text{фэ}} \geq 3$ , полученные для средних значений чисел фотоэлектронов, регистрируемых каждым SiPM, равными 142, 97, 77 и 45 соответственно.

Хорошее соответствие измеренных и расчетных значений эффективностей регистрации электронов для случая со средним  $\bar{n}_{\text{фэ}} = 45$  (эффективность 40% для 100 кэВ электронов) позволяет прогнозировать значения эффективностей с ростом световыхода сцинтилляционных пластин. Так, для уже достигнутого уровня световыхода пластин в  $\bar{n}_{\text{фэ}} = 77$  и  $\bar{n}_{\text{фэ}} = 97$  (счетчики № 2 и № 3) ожидаемая эффективность регистрации 100 кэВ электронов составит 90 и 98%. соответственно. При дальнейшем повышении световыхода пластин до  $\bar{n}_{\text{фэ}} = 142$ , который соответствует световыходу таких же по размерам пластин сцинтилляторов из поливинилтолуола BC-408 [18] или EJ-200 [19], эффективность регистрации 100 кэВ электронов должна составить уже практически 100%. В таблице 1 приведены измеренные и расчетные значения эффективностей регистрации электронов детекторами бета загрязнений.

Следует отметить, что при фиксированных значениях порогов формирователей импульсов SiPM фоновый (шумовой) счет детектора можно регулировать только временным разрешением схемы совпадений или понижением температуры фотоприемника.

Основные параметры счетчиков для регистрации бета загрязнений ног представлены в Таблице 1.

**Таблица 1. Параметры\* тонких счётчиков размером 2,5×170×320 мм<sup>3</sup> при напряжении смещения SiPM 30,0 В.**

Номер счётчика	Порог формирователя, фэ	Световыход SiPM от MIP, фэ	Световыход SiPM от 975 кэВ $e^-$ , фэ	Эффективность регистрации 100 кэВ $e^-$ , %	Фоновый счет, 1/с
1	3	19	45	40 (измерения и расчет)	800
2	3	27	77	92 (расчет)	800
3	3	41	97	98 (расчет)	
4 (модель расчётная)		60	142	100 (расчёт)	

\*Приведённые в таблице параметры являются измеренными за исключением имеющих уточнения в скобках.

## 5. Заключение

В работе подробно рассмотрены конструкция и характеристики различных тонких сцинтилляционных счётчиков с большой геометрической апертурой, которые широко применяются в практике физического эксперимента, равно как и в приборах контроля бета загрязнений персонала, имеющего отношение к радиоактивным материалам. Показано, что счетчики со светосбором на основе спектросмещающих волокон, сопряженных с кремниевыми фотоумножителями в качестве фотодетекторов, легко адаптируются к множеству актуальных в настоящее время задач. В частности, показано, что данный тип тонких счётчиков может быть эффективно использован в качестве детектирующего элемента в комплексных системах обнаружения радиоактивных загрязнений персонала. Ориентировочно, у рассмотренного в данной работе образца детектора загрязнений эффективность регистрации электронов с энергией 100 кэВ составляет около 40% (Рис. 16). Но уже у детекторов с достигнутым уровнем световыхода сцинтилляционных пластин в  $\bar{n}_{\text{ФЭ}}=97$  эффективность должна составить 98%. Актуальной задачей здесь, тем не менее, остается повышение световыхода сцинтилляторов счетчиков и подавление шумов кремниевых фотоумножителей.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда No 22-12-00095, <https://rscf.ru/project/22-12-00095/>.

## Список литературы

- [1] <http://www.oka.ihep.su/>
- [2] Боголюбский М.Ю., Евдокимов С.В., Изучеев В.И., Паталаха Д.И., Полищук Б.В., Садовский С.А., Соловьев А.С., Столповский М.В., Харлов Ю.В., Кузьмин Н.А., Обудовский В.П., Петухов Ю.П., Сычков С.Я. // ЯФ 2013, Т. 76, № 11, с.1-15;
- [3] Евдокимов С.В., Изучеев В.И., Кондратюк Е.С., Полищук Б.В., Садовский С.А., Харлов Ю.В., Шангараев А.А. // Письма в ЖЭТФ, 2021. Т.113. № 5. с.29;
- [4] Горин А.М., Евдокимов С.В., Зайцев А.А., Изучеев В.И., Полищук Б.В., Романишин К.А., Рыкалин В.И., Садовский С.А., Харлов Ю.В., Шангараев А.А. // Письма в ЖЭТФ. Т. 118, № 9, с. 629 – 636.
- [5] Горин А.М., Евдокимов С.В., Зайцев А.А., Изучеев В.И., Кондратюк Е.С., Полищук Б.В., Рыкалин В.И., Садовский С.А., Харлов Ю.В., Шангараев А.А. // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. 2023, Т. 87, № 8, с.1109-1115
- [6] Рыкалин В.И., Рахматов В.Е., Соловьев Ю.А. // ПТЭ 1993, №2, с.243.
- [7] <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/101010/4e369282c60744eb80a7f64c8679aa52/IEC-61098-2023.pdf>
- [8] A. Gorin, V. Dyatchenko, V. Kovalev, V. Rykalin // Nuclear.Inst. and Methods in Physics Research, A952 (2020) 162129
- [9] <https://eos.su/ru/products-tech/products/silikonovye-kompaundy-siel.html>
- [10] Бреховских В.В., Волков В.В., Горин А.М., Медынский М.В., Морозова В.В., Рыкалин В.И., Чернецов М.И. // Патент РФ RU2607518С1
- [11] <https://ru.wikipedia.org/wiki/MINOS>
- [12] <https://atlas.cern.ch/>
- [13] [https://www.bnl.gov/rhic/export1/phenix/www/phenix\\_bnl.html](https://www.bnl.gov/rhic/export1/phenix/www/phenix_bnl.html)
- [14] <https://www.manualslib.com/manual/2056163/Sensl-C-Series.html>
- [15] Buzhan P., Karakash A. // ICNRP Volga 2020. 1689 (2020) 012011. doi:10.1088/1742-6596/1689/1/012011
- [16] [https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf)

- [17] Дулов Е.Н., Воронина Е.В., Масленникова А.Е., Бикчантаев М.М. // [kpfu.ru/portal/docs/F1590203643/Beta\\_LAST\\_4DAT.pdf](http://kpfu.ru/portal/docs/F1590203643/Beta_LAST_4DAT.pdf)
- [18] <https://www.pe2bz.philpem.me.uk/Comm01/-%20-%20Ion-Photon-RF/-%20-%20Scintillation/Site-001/Crystals/CastPlastic/bc408.htm>
- [19] <https://wiki.jlab.org/ciswiki/images/4/49/EJ-200.pdf>

*Рукопись поступила 25 октября 2023 г.*

Бреховских В.В. и др.

Применение тонких сцинтилляционных счётчиков в детекторах частиц.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 30.10.2023                      Формат 60 × 84/16.                      Цифровая печать.

Печ.л. 1,5.      Уч.–изд.л. 2.      Тираж 60.      Заказ 19.                      Индекс 3649.

---

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2023-15,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2023

---