

УДК 539.1.074.6

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ В ДЕТЕКТОРАХ ЧАСТИЦ (обзор)

© 2024 г. В. В. Бреховских<sup>a,\*</sup>, А. М. Горин<sup>a</sup>, В. А. Дятченко<sup>a</sup>,  
С. В. Евдокимов<sup>a</sup>, А. А. Зайцев<sup>b</sup>, В. И. Изучеев<sup>a</sup>, М. В. Медынский<sup>a</sup>,  
В. И. Рыкалин<sup>a</sup>, С. А. Садовский<sup>a</sup>, А. А. Шангараев<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова  
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”  
Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

<sup>b</sup>Объединенный институт ядерных исследований  
141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

\*e-mail: brekhovs@ihep.ru

Поступила в редакцию 10.11.2023 г.

После доработки 13.04.2023 г.

Принята к публикации 29.05. 2024 г.

Рассматриваются конструкции и характеристики тонких сцинтилляционных счетчиков 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 частиц, а также в установках контроля бета-загрязнений одежды и различных предметов посредством выделения сигналов от низкоэнергетических 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.

DOI: 10.31857/S0032816224040019 EDN: NZPSXG

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Тонкие сцинтилляционные счетчики с характерной толщиной до 5 мм и широкой геометрической апертурой находят широкое применение в ядерной физике и физике промежуточных энергий. Применение таких счетчиков в физических экспериментах в основном в качестве пучковых и различного типа вето-счетчиков заряженных частиц позволяет минимизировать фон, возникающий при прохождении через сцинтилляторы и световоды счетчиков интенсивных потоков частиц из-за взаимодействия с веществом счетчиков, и сохранить высокую эффективность регистрации заряженных частиц.

Конструктивно тонкие счетчики можно разделить на два типа: состоящие из сцинтилляци-

онной пластины, сочлененной с фотоприемником, и с использованием вывода излучения из сцинтилляционных пластин с помощью спектросмещающих (wave length shifters, WLS) волокон. В качестве фотодетекторов обычно используются вакуумные или полупроводниковые фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Необходимость применения тонких счетчиков можно показать на примере нескольких экспериментов в области промежуточных энергий.

В экспериментах по исследованию редких распадов  $K^+$ -мезонов на установке ОКА [1] используется пучок частиц с импульсом 17.7 ГэВ/с и интенсивностью вплоть до  $3 \cdot 10^6$  частиц/с, обогащенный каонами. Для получения триггера на прохождение каонов крайне необходимо сделать триггерные счетчики 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 используют триггерные счетчики толщиной 1 мм.

В эксперименте Гиперон-М [2–4] на серии ядер (Be, C, Al, Cu, Sn, Pb) проводятся прецизионные измерения масс легких 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 миллиметров 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 счетчика является принципиальной, так как это приводит к уменьшению фона от взаимодействий частиц пучка со счетчиком. При этом оказалось также недопустимым и наличие у этого счетчика 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+ [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 счетчиков в установках для контроля

бета-загрязнений, где именно минимальная толщина сцинтиллятора при необходимых размерах детектора определяет уровень подавления гамма- и, соответственно, выделение бета-излучения счетчиком и его эффективность, т.е. в конечном счете определяет качество установки для контроля бета-загрязнений.

## 2. ТОНКИЕ СЧЕТЧИКИ НА ОСНОВЕ ВАКУУМНЫХ ФЭУ

### 2.1. Пучковые мониторные счетчики на установке ОКА

Нет особых проблем изготовить тонкий сцинтилляционный счетчик даже толщиной в доли миллиметра, когда необходимая площадь сцинтилляционной пластины составляет десятки квадратных сантиметров. Проблемы начинаются, когда эта площадь составляет сотни квадратных сантиметров. При таких площадях пластин потери света при сочленении с помощью световодов торцов пластин с плоскими окнами фотокатодов обычных вакуумных ФЭУ становятся значимыми. 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 фотоумножителя ФЭУ-КС [6], разработанного в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, который представляет собой стеклянную колбу диаметром 40 мм с бишелочным фотокатодом размерами  $15 \times 200 \text{ мм}^2$ , 10-диодной умножительной системой длиной 200 мм и одним или двумя протяженными анодами, рис. 1.

Такая конструкция фотоумножителя позволяет существенно упростить узел сочленения сцинтиллятора с окном фотокатода за счет исключения использования световода. Это значительно улучшает эффективность собирания сцинтилляционного излучения на фотокатод

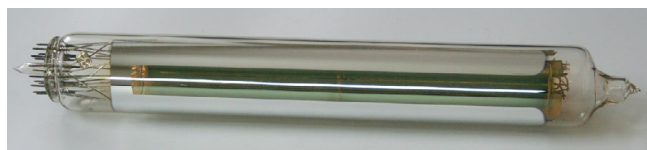


Рис. 1. Фотоумножитель ФЭУ-КС.

ФЭУ. Чувствительность фотокатода ФЭУ-КС составляет около 70–80 мА/Вт. Величина усиления диодной системы находится в пределах  $2 \cdot 10^6$ – $5 \cdot 10^6$ . 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>.

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



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

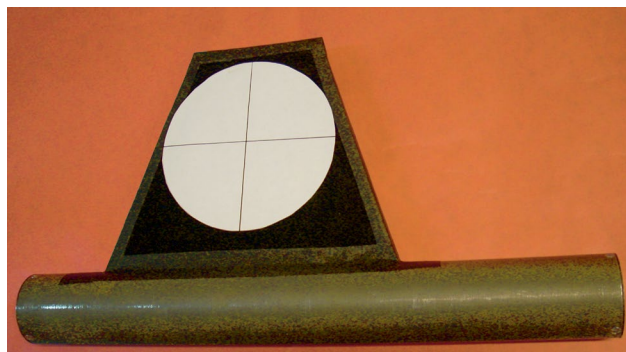


Рис. 3. Общий вид тонкого счетчика, расположенного перед мишенью установки Гиперон-М.

## 2.2. Тонкий сцинтилляционный счетчик установки Гиперон-М

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

В счетчике 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 трех нитей. Сцинтиллятор размещен внутри трапециевидного кожуха, закрепленного на цилиндрическом корпусе ФЭУ-КС. Кожух обклеен внутри алюминизированным лавсаном с высоким, не менее 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 удаленную от фотокатода область сцинтиллятора составляет 15 фэ, что соответствует световыходу около 150 фэ/МэВ.

## 2.3. Детектор загрязнений на основе ФЭУ-КС

Высокий световыход счетчиков 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  $120 \times 200$  мм<sup>2</sup> для контроля ладоней рук и не менее  $150 \times 350$  мм<sup>2</sup> 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 счетчики 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 счетчиков 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 по пластине сцинтиллятора от фотокатода до рабочего окна примерно 1 см. Рабочее положение опытного образца детектора вертикальное (для измерения загрязнения правой или левой руки).

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 СЧЕТЧИКИ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ ВОЛОКОН И ВАКУУМНЫХ ИЛИ 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



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

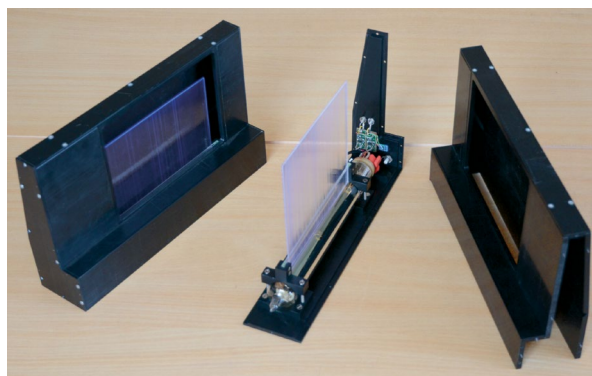


Рис. 5. Вид счетчиков детектора: сняты светозащитные пленки-отражатели левого и правого счетчиков, правый счетчик вынут из корпуса.

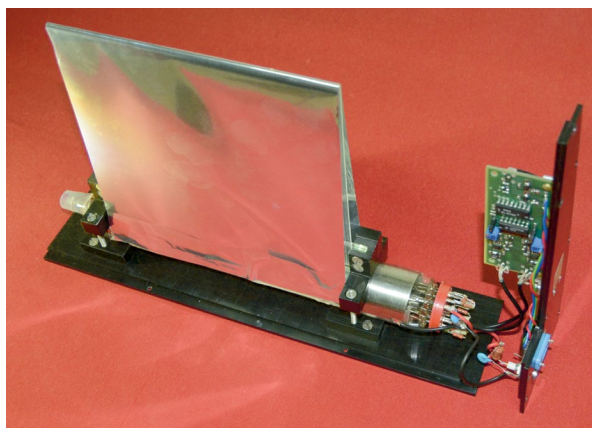


Рис. 6. Вид счетчика детекторов бета-загрязнений с “домиком” — отражателем из алюминизированного лавсана.

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 оснащен экструдированными сцинтилляторами, о масштабах производства которых можно судить по используемым только в эксперименте МИНОС [11], в количестве 100 000 штук, сцинтилляционным полос с размерами поперечного сечения  $10 \times 41 \text{ мм}^2$  длиной 8 м и канавкой на широкой грани полосы для укладки в нее одного WLS-волокна. По этой технологии возможно изготовление с высокой производительностью сцинтилляционных полос толщиной от 10 мм до долей миллиметра.

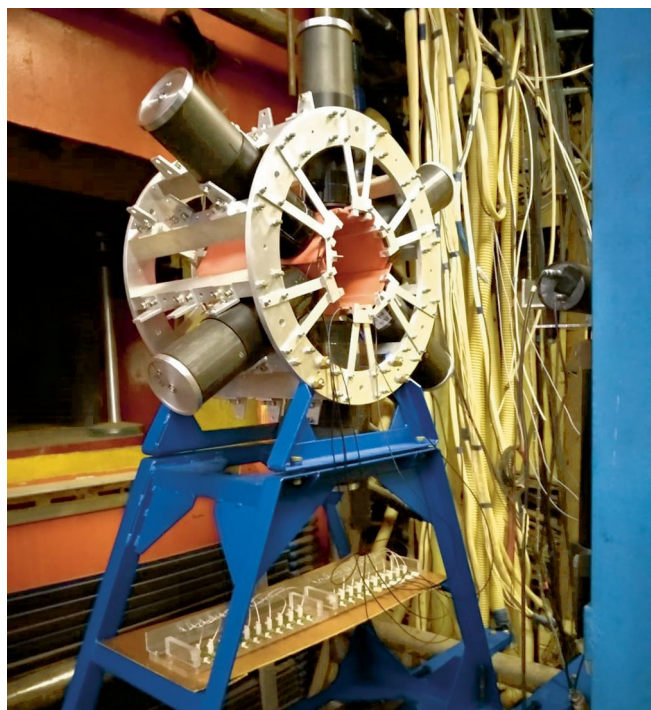
Производительность современных литьевых машин соответствует двухминутному рабочему циклу, что позволяет изготавливать огромное количество сцинтилляционных пластин с максимальной толщиной в несколько мм. Так, для адронного калориметра установки АТЛАС [12] изготовлено около 460 000 пластин различной

формы. Еще 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 нее WLS-волокнами по сути является тонким счетчиком. Подобные пластины нашли широкое применение и для изготовления многочисленных отдельных тонких счетчиков 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 литье 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 рассматриваемые ниже сцинтилляторы тонких счетчиков, и тонкие счетчики для детекторов бета-загрязнений.

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

Установка Гиперон+ [5] 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 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



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

счетчиков перекрыты шестью продольными сцинтилляционными счетчиками 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.

Продольный сцинтилляционный счетчик 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 ее поверхности вклеены WLS-волокна, торцы которых собраны и вклеены в жгут с поперечным сечением  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>. Отшлифованный торец жгута соединяется с SiPM, фоточувствительная область которого также имеет размеры  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>. Выходные сигналы SiPM через тонкий коаксиальный кабель длиной 1 м поступают на усилители (рис. 7, внизу). На рис. 8 показан продольный тонкий счетчик без светоизолирующей бумажной и светоотражающей (Тайвек) оберток, а на рис. 9 — счетчик в сборе вместе со встроенным SiPM.

По измерениям на МIP (космические мюоны) световой выход счетчиков составляет не менее 55 фэ или 87 фэ/МэВ. Неоднородность светосбора по площади счетчиков, измеренная с помощью радиоактивного источника <sup>207</sup>Bi, составляет  $\pm 10\%$ .

В случае использования сцинтилляционных счетчиков на основе WLS и SiPM в экспериментах на интенсивных пучках частиц [1] остается неясным, до каких интенсивностей счетчики могут регистрировать частицы. Измерения, проведенные при возбуждении сцинтиллятора описанного выше продольного тонкого счетчика импульсами ультрафиолетового света, подтвердили данные [14], что при использовании “быстрого” вывода сигнала SiPM предельная частота световых импульсов не менее 20 МГц.

#### 4. ТОНКИЕ СЧЕТЧИКИ ДЕТЕКТОРОВ БЕТА-ЗАГРЯЗНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ ВОЛОКОН И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФЭУ

Широкое распространение методики вывода излучения сцинтилляторов спектросмещающими волокнами и его регистрации с помощью



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



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

кремниевых ФЭУ (SiPM) привели к разработкам тонких счетчиков на этих элементах, в том числе и для детекторов бета-загрязнений [15]. Ниже обсуждаются конструкции и характеристики тонких счетчиков для детекторов бета-загрязнений ног и рук, разработанные в НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ.

##### 4.1. Конструкция счетчиков

Конструктивно счетчик детектора загрязнений рук или ног представляет собой светоизолированную коробку из черного поливинилацетата с тонким входным окном, состоящим из светоотражающей алюминизированной лавсановой пленки толщиной 12 мкм и светозащитной пленки толщиной 15 мкм. В коробке находится тонкая сцинтилляционная пластина с размерами  $2.5 \times 140 \times 210$  мм<sup>3</sup> 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 (ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика) длительностью 200 нс. Общие виды счетчика представлены на рис. 10 и рис. 11.

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

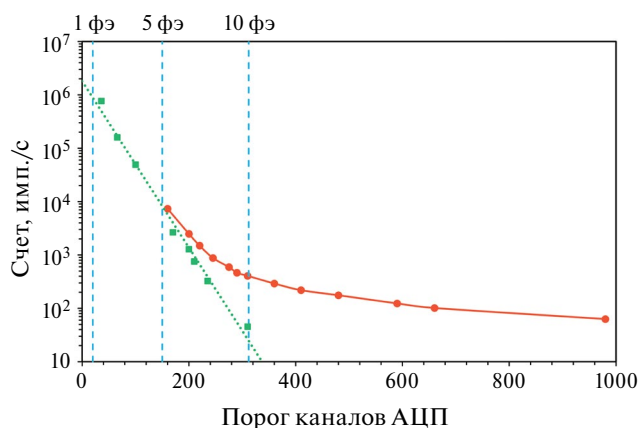
Отметим, что при использовании схемы совпадений на каждый из двух используемых SiPM поступает только половина излучения, собираемого WLS-волоконными. Поэтому пороги формирователей сигналов от каждого SiPM соотносятся с соответствующей половиной общего светового сигнала, что приводит к падению отношения сигнал/тепловой шум SiPM. Однако при порогах регистрации около 3 фэ и шумовом счете каждого канала регистрации порядка 30000 импульсов/с схема совпадений позволяет существенно подавить шумы — примерно в 200 раз.



**Рис. 10.** Фото общего вида счетчика без светоотражающей и светозащитной обертки: сцинтилляционная пластина с WLS-волоконными, двумя SiPM, к которым присоединены торцы волокон, и электронным модулем.



**Рис. 11.** Фото общего вида счетчика в сборке.



**Рис. 12.** Скорость счета (при напряжении смещения 30.5 В) в зависимости от порога дискриминации формирователей: линия с круглыми маркерами — счет шумов и естественного радиоактивного фона счетчика с размерами  $50 \times 500 \times 500$  мм<sup>3</sup>, с использованием WLS и одного SiPM, линия с квадратными маркерами — собственный шумовой счет изолированного SiPM.

#### 4.2. Изучение характеристик детектора бета-загрязнений

Рассматриваемые детекторы бета-загрязнений рук и ног различаются 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  $n_{фэ}$ , регистрируемых при прохождении частиц с минимальной ионизацией через сцинтиллятор счетчика, 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,

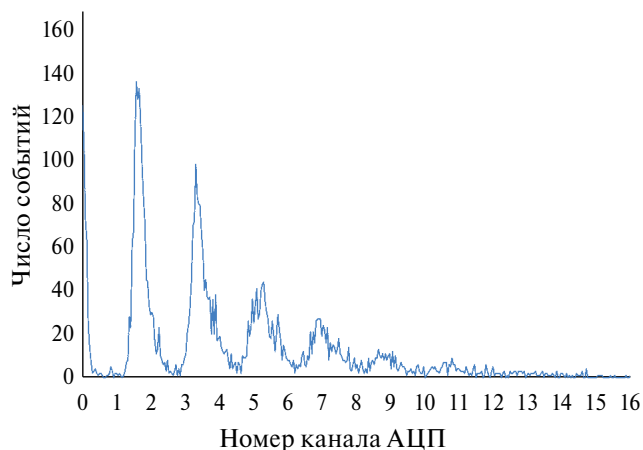
регистрируемых SiPM при возбуждении сцинтилляционной пластины счетчика импульсами ультрафиолетового излучения светодиода; калибровочный спектр приведен на рис. 13. Указанные выше измерения проводились с помощью многофункционального осциллографа LeCroy Wave Runner 606 Zi 600 MHz.

На рис. 14 приведен суммарный спектр сигналов SiPM — одного из лучших счетчиков при регистрации электронов от радиоактивного источника  $^{207}\text{Bi}$ . Следует отметить [17], что пересечение аппроксимации линейной части правого склона этого спектра с энергетической осью (каналы АЦП) соответствует максимальной энергии наиболее интенсивной линии электронов распада  $^{207}\text{Bi}$  с максимальной энергией 975 кэВ. Действительно, при установке пластмассового (плексиглас) фильтра толщиной 1 мм между этим источником и детектором загрязнений правый склон спектра значительно “съезжает” в сторону меньших энергий (рис. 15), что может быть связано только с поглощением фильтром части энергии электронов.

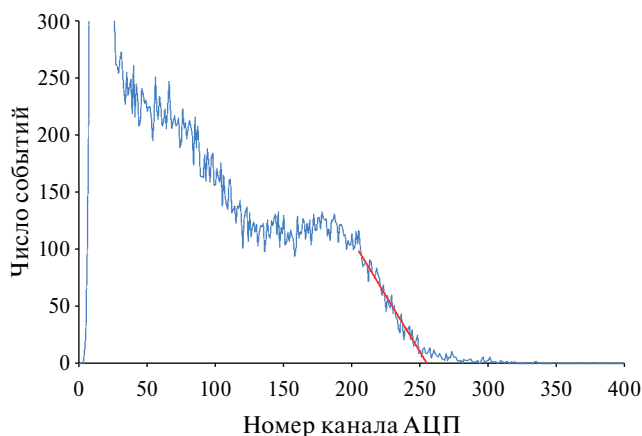
Использование в рассматриваемых детекторах загрязнений “стандартного” вывода сигнала от SiPM позволяет получить более высокое спектрометрическое разрешение по сравнению с использованием “быстрого вывода” [14]. Испытания счетчиков, проведенные при их возбуждении ультрафиолетовыми световыми импульсами, генерирующими сигналы со средним числом фотоэлектронов  $n_{\text{фэ}} = 20$ , показали, что нагрузочная способность счетчиков составляет не менее 500 кГц.

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 (счет — 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 11000 Бк с максимальной энергией электронов около 1 МэВ. Наибольшее отклонение отклика от средней величины не превысило  $\pm 15\%$ .

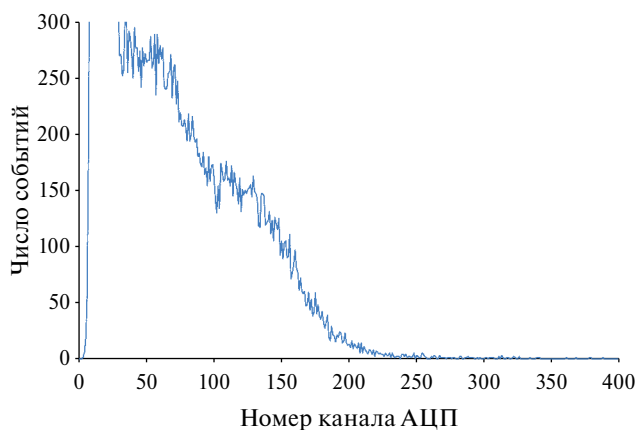
При использовании этого  $^{207}\text{Bi}$  как реперного источника электронов с максимальной энергией 975 кэВ были определены ожидаемые



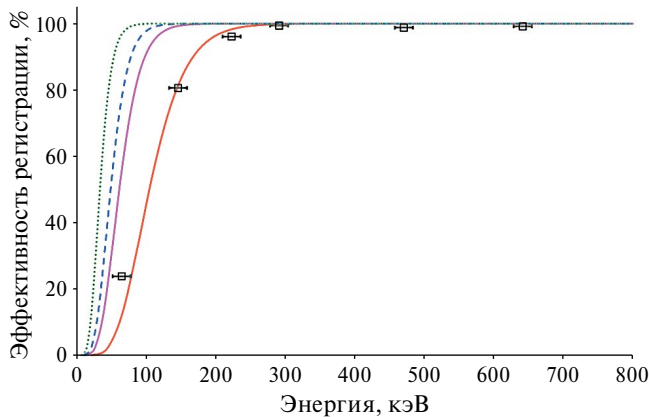
**Рис. 13.** Калибровочный спектр при малом количестве фотоэлектронов. Левый пик в спектре соответствует педесталу, последующие — импульсам однофотонных сигналов, двухфотонных и так далее.



**Рис. 14.** Амплитудный спектр суммы сигналов обоих SiPM 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 плексивным фильтром.



**Рис. 16.** Зависимости эффективности регистрации электронов от их энергии при значениях напряжения смещения SiPM 30 В: квадратные маркеры – результаты измерений эффективности счетчика загрязнений. Пунктирная, штриховая, сплошная и линия, проходящая через экспериментальные точки, соответствуют расчетным результатам вероятности событий с  $n_{\text{фэ}} \geq 3$ , полученным для средних значений чисел, регистрируемых каждым SiPM фотоэлектронов, равных 142, 97, 77 и 45.

величины эффективности регистрации средним по качеству счетчиком электронов с фиксированной энергией. Для этого после калибровки шкалы каналов в кэВ и, соответственно, в фотоэлектронах измерялись эффективности регистрации УФ-импульсов 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 выхода сцинтилляционных пластин с помощью распределения Пуассона были рассчитаны зависимости вероятности событий с  $n \geq 3\text{фэ}$  для

средних чисел регистрируемых каждым SiPM фотоэлектронов, равных 142, 97, 77 и 45. Указанные зависимости с возведенными в квадрат значениями вероятности событий для каждого числа фотоэлектронов  $n_{\text{фэ}}$  моделируют работу детектора загрязнений с использованием схемы совпадений. Они показаны на рис. 16 соответственно пунктирной, штриховой, сплошной и сплошной, проходящей через экспериментальные точки линиями.

Хорошее соответствие измеренных и расчетных значений эффективностей регистрации электронов для случая со средним  $n_{\text{фэ}} = 45$  (эффективность 40%) позволяет прогнозировать значения эффективностей с ростом световых выхода сцинтилляционных пластин. Так, для уже достигнутого уровня световых выхода пластин в  $n_{\text{фэ}} = 97$  ожидаемая эффективность регистрации электронов с энергией 100 кэВ составляет 98%. При дальнейшем повышении световых выхода пластин до  $n_{\text{фэ}} = 142$ , который соответствует световых выходам таких же по размерам пластин из сцинтилляторов BC-408 [18] или EJ-200 [19], эффективность регистрации электронов с энергией 100 кэВ должна составить уже практически 100%. В табл. 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 как временным разрешением схемы совпадений, так и понижением температуры фотоприемника.

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

**Таблица 1.** Параметры тонких счетчиков детекторов загрязнений ног при напряжении на SiPM 30 В

| Размеры, мм <sup>3</sup> | Порог формирователя, фэ | Световыход SiPM от MIP, фэ | Световыход SiPM от 975 кэВ $e^-$ , фэ | Эффективность регистрации 100 кэВ $e^-$ , % | Фоновый счет, 1/с | Загрузочная способность, кГц |
|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|------------------------------|
| 2.5×170×320              | 3                       | 19                         | 45                                    | 40 (измерения, расчет)                      | 800, измерения.   | 200                          |
| 2.5×170×320              | 3                       | 27                         | 77                                    | 92, расчет                                  | 800, измерения    | 200                          |
| 2.5×170×320              | 3                       | 41                         | 97                                    | 98, расчет                                  |                   |                              |
| 2.5×170×320              | 3                       | 60                         | 142                                   | 100 расчет                                  |                   |                              |

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе подробно рассмотрены конструкция и характеристики различных тонких сцинтилляционных счетчиков с большой геометрической апертурой, которые широко применяются в практике физического эксперимента, равно как и в приборах контроля бета-загрязнений. 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 счетчиков может быть эффективно использован в качестве детектирующего элемента в комплексных системах обнаружения радиоактивных загрязнений персонала. 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 97 фотоэлектронов эффективность должна составить 98%. Актуальной задачей здесь, тем не менее, остается повышение световыхода сцинтилляторов счетчиков и подавление шумов кремниевых фотоумножителей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.М. Зайцеву за поддержку работы, М.Н. Уханову за интерес к работе и полезные обсуждения и всему коллективу сектора сцинтилляционных и фотоэлектронных приборов НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ за помощь в изготовлении сцинтилляционных счетчиков.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 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. 1389.  
<https://doi.org/10.7868/S0044002713110044>

3. Евдокимов С.В., Изучеев В.И., Кондратюк Е.С., Полищук Б.В., Садовский С.А., Харлов Ю.В., Шангареев А.А. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113. № 5. С. 291.  
<https://doi.org/10.31857/S1234567821050013>
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., Шангареев А.А. // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 118. № 9. С. 629.  
<https://doi.org/10.31857/S1234567823210012>
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., Шангареев А.А. // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 8. С. 1109.  
<https://doi.org/10.31857/S0367676523701995>
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. Gorin A., Dyatchenko V., Kovalev V. // Nuclear.Inst. and Methods in Physics Research A. 2020. V. 952 P. 162129.
9. <https://eos.su/ru/products-tech/products/silikon-ovye-kompaundy-siel.html>
10. Рыкалин В.И., Медынский М.В., Джорджадзе В.П., Бицадзе Г.С. РФ Патент. RU2607518C1, 2017.
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. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1689. P. 012011.  
<https://doi.org/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. Бета-спектроскопия: регистрация спектров бета-частиц, прохождение бета-частиц через вещество. Препринт. Казань: Казанский федеральный университет, 2013.  
[https://kpfu.ru/portal/docs/F1590203643/Beta\\_LAST\\_4DAT.pdf](https://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>