

УДК 538.915

МНОГОСЛОЙНЫЙ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ СЧЕТЧИК НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ SiPM И ОРГАНИЧЕСКОГО СВЕТОВОДА

© 2022 г. Д. Н. Трунов^{a, b, *}, В. Н. Марин^{a, b}, Р. А. Садыков^b,
С. Н. Аксенов^b, Е. В. Алтынбаев^a, В. С. Литвин^b

^aНаучно-исследовательский центр “Курчатовский институт” – ПИЯФ,
Гатчина, 188300 Россия

^bИнститут ядерных исследований Российской академии наук,
Москва, 117312 Россия

*e-mail: dtrunov@inr.ru

Поступила в редакцию 17.01.2022 г.

После доработки 08.03.2022 г.

Принята к публикации 08.03.2022 г.

Описаны новые созданные сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей и световодов из органического стекла. Такой тип детектора может стать альтернативой газонаполненным детекторам, в которых средой является дорогостоящий ^3He . В настоящей работе качестве сцинтиллятора использован $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ с расчетной эффективностью 42% для тепловых нейтронов. В качестве световода использован оптически прозрачный пластик. Размеры готового детектора составили $60 \times 5 \times 5$ мм. Толщина слоев сцинтиллятора была фиксированной и равнялась 0.5 мм. Толщину световода варьировали в диапазоне от 0.3 до 1.8 мм в зависимости от количества слоев сцинтиллятора, она ограничена общей толщиной детектора. Описан метод изготовления и склейки таких сцинтилляционных детекторов. Приведены первые результаты тестирования счетчиков нейтронов с различным количеством слоев сцинтиллятора. При использовании двух слоев сцинтиллятора эффективность такого типа детектора нейтронов составила 42%. При увеличении количества слоев сцинтиллятора до пяти эффективность возросла до 90%.

Ключевые слова: нейтроны, детекторы, кремниевые фотоумножители, сцинтиллятор, гейгеровские лавинные фотодиоды, многослойный детектор, сцинтилляционный детектор, органический световод.

DOI: 10.31857/S1028096022100168

ВВЕДЕНИЕ

С 2012 г. в лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН ведут разработку сцинтилляционных детекторов нейтронов на основе $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ (сульфид цинка, активированный серебром с добавкой фтористого лития, обогащенного до 90% изотопом ^6Li) и кремниевых фотоумножителей (SiPM). Первые результаты были опубликованы в 2015 г. [1]. Детекторы в первую очередь разрабатывали для замены пропорциональных гелиевых счетчиков основной недостаток которых это высокая текучесть ^3He . Также в настоящее время существует дефицит изотопа гелия, и во всем мире ведут различные исследования по поиску и созданию альтернативных типов детекторов нейтронов без использования ^3He [2]. Одним из таких вариантов замещения гелиевых счетчиков является создание твердотельных счетчиков нейтронов на основе различных сцинтилляторов [2–4].

Сцинтиллятор $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ является перспективным материалом для применения в таких детекторах, благодаря его большому световыходу (1.6×10^5 фотонов/нейтрон), достаточному для достоверной регистрации события, нечувствительности к гамма-излучению и относительной дешевизне. В то же время непрозрачность в видимом диапазоне $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ [5] делает проблематичным получение сигнала от сцинтиллятора. Появление новых фотодетекторов – гейгеровских лавинных фотодиодов или, иначе, кремниевых фотоумножителей (SiPM) – открывает новые возможности развития сцинтилляционных нейтронных детекторов [6]. Они имеют достаточно компактный размер и достаточно высокую квантовую эффективность регистрации фотонов [7]. Также, в отличие от ставшей уже классической схемы, получение сигнала с помощью фотоэлектронных умножителей не требует высокого на-

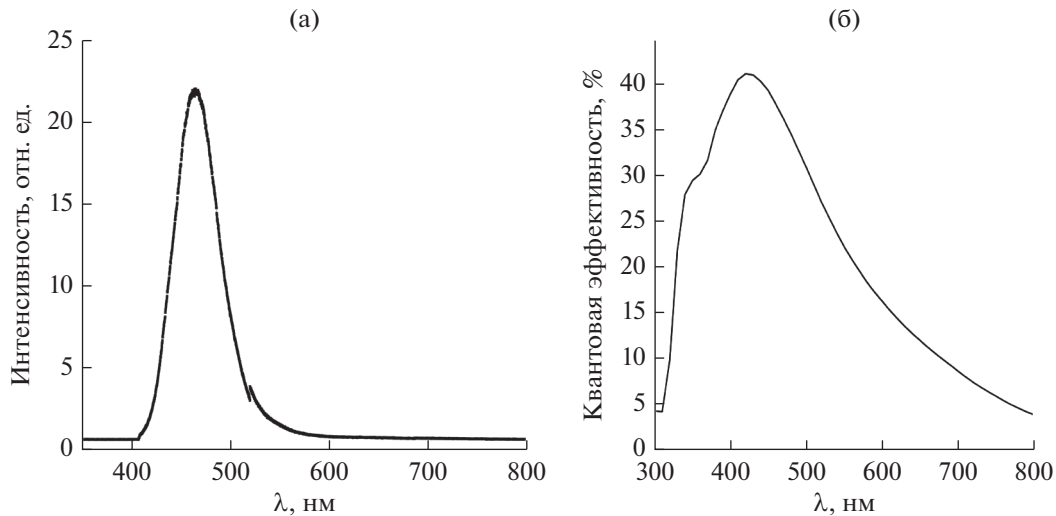


Рис. 1. Оптические параметры сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя, а – световыход сцинтиллятора [11]; б – квантовая эффективность кремниевого фотоумножителя [8].

пряжения, что упрощает проектирование детекторов и электроники.

Преимущество использования именно комбинации $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ и SiPM связано с тем, что наиболее высокая чувствительность SiPM приходится на длину волны около 465 нм [8], что соответствует длине волны испускаемых сцинтиллятором фотонов (рис. 1).

Органическое стекло было выбрано в качестве световода, т.к. у него отсутствуют потери на переизлучение фотонов в отличие от так называемых спектросмещающих волокон [9, 10]. Также, что немаловажно, его достаточно легко обрабатывать и с ним появляется возможность использовать различные приемы сбора света по законам оптики, например создание линз для концентрации фотонов на чувствительной области SiPM. Еще одной особенностью SiPM является достаточно низкое максимальное напряжение питания (не более 40 В). В настоящее время стали доступны SiPM с различной чувствительной площадью: от 1×1 до 6×6 мм. Квантовая эффективность современных SiPM доходит до 45% [7]. Основным минус по сравнению с фотоэлектронными умножителями – это достаточно высокий “тепловой шум” (около 30 кГц/мм²), который вызван тепловой генерацией электронов в активной области кремния [7], но с помощью различных особенностей электроники можно избавиться и от него. В частности, в разработанных нами приборах [1, 13, 14] применены два SiPM, схема совпадений и схема компенсации напряжения в зависимости от температуры для стабилизации “теплового шума”. Разработанная схема сбора излучения, включающая компаратор, позволила достичь уровня полезного сигнала в 5–7 раз превышающего

“тепловой”, что полностью устранило негативное влияние “теплового шума” SiPM, а также влияние гамма-излучения [11].

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ДЕТЕКТОРЫ

Настоящее исследование является продолжением работ, посвященных разработке и усовершенствованию твердотельных детекторов нейтронов. При создании новых высокоэффективных счетчиков использованы все полученные ранее данные [1, 13, 14].

Общий вид детектора представлен на рис. 2. Он состоит из 2 слоев сцинтиллятора $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ с эффективностью 42% фирмы Saint-Gobain [12]. Между слоями расположен световод из органического стекла Plexiglass и в нем вырезаны линзы типа “рыбий глаз” [13]. Излучение транспортируется световодом и регистрируется двумя SiPM фирмы Sensl типа C [8]. Детектор обернут лентой на основе фторопласта для более эффективного сбора света за счет диффузионного отражения. Эти детекторы уже достаточно хорошо себя зарекомендовали в нейтронографических установках [13, 14].

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Увеличение эффективности регистрации нейтронов твердотельными детекторами на основе сцинтилляторов возможно лишь двумя способами: за счет повышения эффективности самого сцинтиллятора и увеличением количества слоев сцинтиллятора.

Первое невозможно без увеличения толщины, а, однако так растет и поглощение самим сцин-

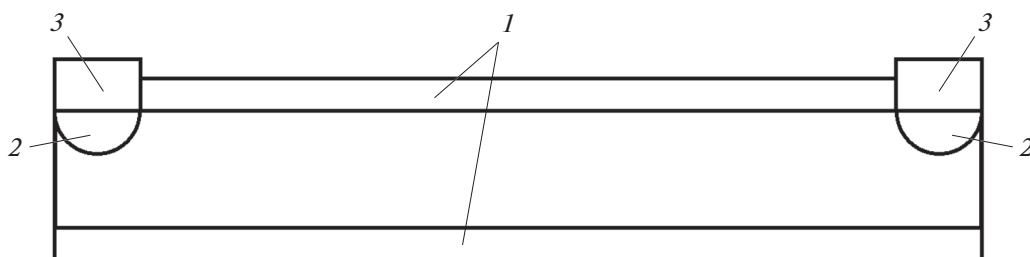


Рис. 2. Общий вид детектора: 1 – сцинтиллятор; 2 – линза типа “рыбий глаз”; 3 – кремниевый фотоумножитель (SiPM).

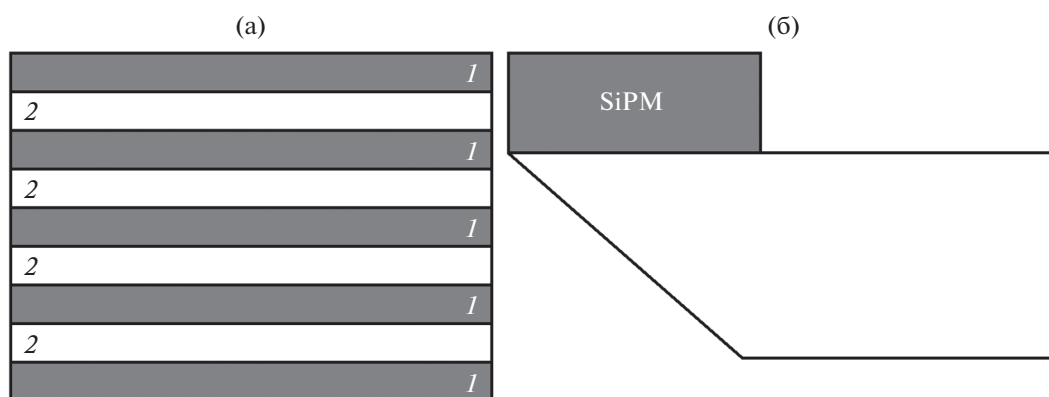


Рис. 3. Схема твердотельного детектора нейтронов. На виде сверху (а) показано расположение слоев: 1 – сцинтиллятор; 2 – световод. На виде сбоку (б) показан срез на границе, заменяющий линзу типа “рыбий глаз”.

тиллятором (так, оптимальной толщиной для создания нейтронных детекторов является 0.5 мм). Максимально доступная на сегодняшний момент эффективность регистрации нейтронов среди производимых сцинтилляторов $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ – 48% (Eljen Technology) [15].

В отличие от первого подхода, изготовление многослойных детекторов намного проще в реализации, и для разработки новых высокоэффективных детекторов настоящей работе использовали именно его. При создании детекторов за основу был взят сцинтиллятор $\text{ZnS:}^6\text{LiF(Ag)}$ фирмы Saint-Gobain эффективностью 42% (для нейтронов с энергией, которая соответствует длине волны 1.9 Å) [12]. В качестве детектора света использовали кремниевые фотоумножители SensI типа C с чувствительной площадью 3×3 мм.

Общий принцип создания детектора показан на рис. 3а. Слои детектора расположены поочередно, сцинтилляторы перемежаются световодами. В новой версии детектора было принято решение отказаться от линзы типа “рыбий глаз” и заменить ее срезом края световода на угол близкий к 45° и длиной 3 мм (рис. 3б). В качестве световода для детектора был применен пластик ПТЕ-А. Но можно использовать абсолютно любой пластик, обладающий достаточной оптиче-

ской прозрачностью (не менее 92%). Внешний вид детектора представлен на рис. 4.

ТЕСТОВЫЕ ОБРАЗЦЫ

В качестве тестовых образцов было создано 5 детекторов с различным количеством слоев сцинтиллятора от 1 до 5. Резку сцинтиллятора и

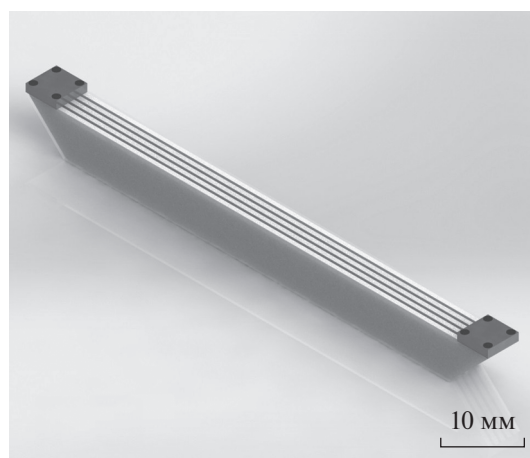


Рис. 4. Модель разработанного детектора.

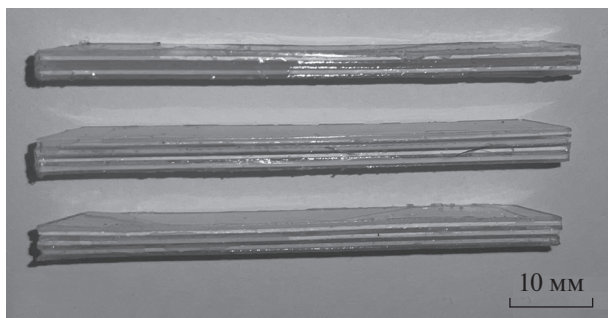


Рис. 5. Внешний вид образцов тестовых детекторов, содержащих различное количество слоев сцинтиллятора.

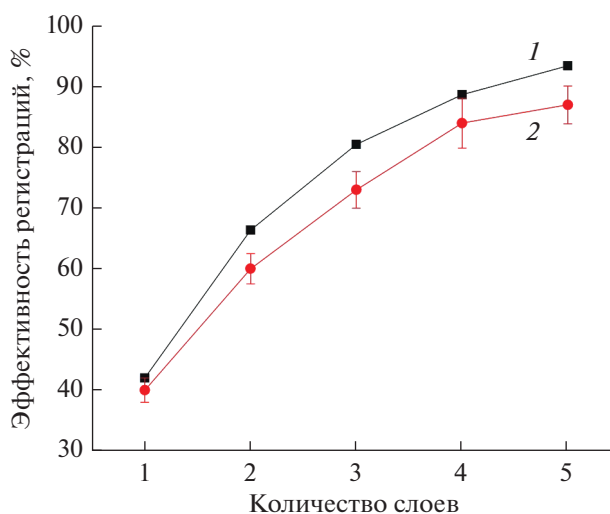


Рис. 6. Теоретически рассчитанная (1) и экспериментально измеренная (2) эффективность детекторов.

пластика осуществляли на станке для лазерной резки Raylogix 6040 v12, с трубкой Reci мощностью 100 Вт. Склейку осуществляли клеем типа “оптический цемент” с коэффициентом преломления 1.6 в сушильной камере с возможностью откачки воздуха. Это сделано для того, чтобы в клее не оставалось пузырьков воздуха, и клеевая прослойка была наиболее однородной. Сушку клея проводили в течение 24 ч. Внешний вид детекторов без покрытия изображен на рис. 5. Далее детекторы покрывали со всех сторон слоем из отражающего алюминия, в нашем случае это был Alanod Miro [16]. Можно использовать другие материалы и методы нанесения, в том числе и метод химического напыления, главное, чтобы покрытие обеспечивало максимальную отражающую способность.

ТЕСТИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Для измерения параметров детектора использовали нейтронное излучение от источника ^{252}Cf .

Во время измерений, чтобы обеспечить радиационную защиту сцинтилляционного счетчика, был построен короб из свинцовых кирпичей толщиной не менее 10 см. Он полностью покрывал объем, в котором находился счетчик, и имел окно для пучка нейтронов размером 10×60 мм. Для термализации нейтронного потока от источника использовали слой полиэтилена толщиной 20 см, набранный из блоков NEUTROSTOP C0 фирмы ООО “Копос Электро” [17]. Детекторы размещали на расстоянии 150 см от источника. В качестве анализатора амплитуды использовали АЦП CAEN DT5720. Для подсчета количества импульсов применяли счетчик импульсов на основе ПЛИС Xilinx spartan-3. Было проведено по 5 измерений длительностью 100 с на источнике нейтронов, и такое же количество измерений без источника для определения “темнового шума” детекторов.

Эффективность детекторов определяли по следующей формуле:

$$\varepsilon = N / (\Phi S_d \cos \theta),$$

где N – количество зарегистрированных нейтронов (выше порога дискриминации) в единицу времени; S_d – площадь поверхности сцинтилляционного экрана; Φ – измеренная плотность потока нейтронов; $\cos \theta$ – средний косинус угла падения нейтронов на поверхность детектора (угол отсчитывали от нормали к поверхности) [18]. Величина плотности потока нейтронов взята из паспортных данных источника нейтронов, пересчитанных с учетом срока эксплуатации источника. Для учета термализации и рассеяния нейтронов на блоках NEUTROSTOP был использован сцинтилляционный счетчик с паспортной эффективностью сцинтиллятора $40 \pm 2\%$, изготовленный по технологии, описанной ранее [1]. Исходя из известной величины его эффективности, была рассчитана плотность потока нейтронов. В дальнейшем это значение и использовали для определения эффективности тестовых детекторов.

Для получения теоретической эффективности был применен метод, известный из других работ по созданию многослойных детекторов [19, 20]. В нем за основу взята эффективность регистрации сцинтиллятора равная 42%. Так первый слой сцинтиллятора задерживает 42% нейтронов, тогда на второй слой падает 58% от первоначального количества нейтронов. Второй слой также захватывает лишь 42% от падающих на него нейтронов, и так далее. По этому принципу были рассчитаны теоретические значения эффективности детекторов, состоящих из от 1 до 5 слоев сцинтиллятора.

На рис. 6 показаны полученная величина эффективности тестовых образцов в сравнении с

максимальным расчетным значением. К сожалению, во время измерений не представлялось возможным выделить именно тепловые нейтроны с энергией, которой соответствует длина волны 1.9 \AA , поэтому данные эффективности представлены для нейтронов всех энергий, падающих на тестовый счетчик. На зависимости видно, что экспериментальные данные об эффективности достаточно близки к теоретическим. Различия в значениях, видимо, связаны с особенностями производства или с тем, что первый и последний слои сцинтиллятора не покрыты световодами с двух сторон. В таком случае событие, которое происходит на поверхности сцинтиллятора без световода, может быть не зарегистрировано.

ВЫВОДЫ

Были разработаны и протестированы высокоэффективные твердотельные счетчики нейтронов. Показано, что многослойные сцинтилляционные детекторы возможно создать с использованием световодов из органического стекла. Была отработана технология подготовки и клеейки подобного типа детекторов. Максимальная достигнутая эффективность составила 90% (для детекторов, состоящих из 5 слоев сцинтиллятора). Простота изготовления данного вида счетчиков и возможность создания различных форм и размеров с достаточно высокой эффективностью позволяет создавать детекторы, максимально оптимизированные под конкретную установку или эксперимент.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Литвин В.С., Аксенов С.Н., Столяров А.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 18. С. 96.
2. *Stave S., Bliss M., Kouzes R., Lintereur A., Robinson S., Siciliano E., & Wood L.* // Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. A. 2015. V. 784. P. 208. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.039>
3. *Stoykov A., Mosset J.-B., Hildebrandt M.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. V. 936. P. 34. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.183>
4. *Vacheret A., Scovell P.R., Haigh M., Shitov Y., Waldron A., Weber A., Giudicelli A., Fierfort A.* // IEEE Nuclear Sci. Symposium Conference Record. 2013. № 6829532. <https://www.doi.org/10.1109/NSSMIC.2013.6829532>
5. *Wu C., Tang B., Sun Z.J., Zhang Q., Yang Z., Zhang J., Yang Y.D., Liang J.C., Wu J.J.* // Radiation Measurements. 2013. V. 58. P. 128. <https://www.doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.04.004>
6. Каталог компании Азимут Фотоникс (2021) Азимут Фотоникс. <https://azimp.ru/catalogue/silicon-pm2/>. Дата обращения 15.10.2021.
7. Методика оценки и сравнения кремниевых фотомножителей (2021) Азимут Фотоникс. <https://azimp.ru/articles/tech/652/>. Дата обращения 15.10.2021.
8. Каталог компании Sensl (2021) SensL Technologies Ltd. <https://www.sensl.com/downloads/ds/TN%20-%20Intro%20to%20SPM%20Tech.pdf>. Дата обращения 15.10.2021.
9. *Харжеев Ю.Н.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2015. Т. 46. Вып. 4. С. 1227.
10. *Stoykov A., Mosset J.-B., Greuter U., Hildebrandt M., Schlumpf N.* // Nuclear Instrum. Methods Phys. Res. A. 2015. V. 787. P. 361. <https://www.doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.076>
11. *Прохорец И.М., Прохорец С.И., Скрыпник А.И., Лукьянова В.П., Хажмурадов М.А.* // АСУ и приборы автоматики. 2010. № 150. С. 28.
12. Saint-Gobain Plastic Scintillator Packaging. 2021. Saint-Gobain. <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/cast-sheet-assemblies>. Cited 15 october 2021.
13. *Литвин В.С., Марин В.Н., Караевский С.Х., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Столяров А.А., Садыков Р.А.* // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 1. С. 115. <https://www.doi.org/10.7868/S0023476116010094>
14. *Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Литвин В.С., Аксенов С.Н.* // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 5. <https://www.doi.org/10.7868/S003281621801007X>
15. Eljent thermal neutron detection ej-426 (2021). Eljen Technology. <https://eljenttechnology.com/products/neutron-detectors/ej-426>. Cited 15 october 2021.
16. Зеркальный анодированный алюминий ALANOD MIRO 4 4400GP (2021). ALANOD GmbH & Co. KG. <http://xn--80aam0alg.xn--plai/have/zerkalnyj-anodirovannyj-alyuminij-alanod-miro-4-4400gp/>. Дата обращения 16.10.2021.
17. Каталог компании “Копос Электро” (2021) Копос Электро. https://www.kopos.ru/sites/default/files/catalog/2017/10/neu_ru_stinici_tvarovky_neutrostop.pdf. Дата обращения 16.10.2021.
18. *Баранова А.А., Окочников А.П., Пустоваров В.А.*, Дозиметрия: учебно-методическое пособие. / Ред. Рябухин О.В. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2020. 112 с.
19. *Belian A.P., Dye H.R., Ensslin N., Geist W.H., Horley E.C., Ianakiev K.D., Kusner M.R., Mayo D.R., Russo P.A., Sweet M.R., Browne M.C.* / Prototype neutron-capture counter for fast-coincidence assay of plutonium in residues (LA-UR-01-2164), Institute of Nuclear Material Management 42 Annual Meeting Indian Wells, California July, 2001
20. *Setsuo Satoh* // Physica B: Condensed Matter. 2018. V. 551. P. 401. <https://www.doi.org/10.1016/j.physb.2018.03.011>

Multilayer High-Performance Scintillation Neutron Counter Based on SiPM and Organic Light Guide

D. N. Trunov^{1, 2, *}, V. N. Marin^{1, 2}, R. A. Sadykov², S. N. Aksenov², E. V. Altynbaev¹, V. S. Litvin²

¹*NRC "Kurchatov Institute" – PNPI, Gatchina, 188300 Russia*

²*NR RAS, Moscow, Troitsk, 117312 Russia*

**e-mail: dtrunov@inr.ru*

The new scintillation neutron detectors based on silicon photomultipliers and organic glass light guides have been described. This type of detectors can become an alternative to gas-filled detectors, in which the medium is expensive ^3He . In this work, ZnS:6LiF(Ag) was used as a scintillator with a calculated efficiency of 42% for thermal neutrons. An optically transparent plastic was used as a light guide. The dimensions of the finished detector are $60 \times 5 \times 5$ mm. The thickness of the scintillator layers was fixed and equal to 0.5 mm. The fiber thickness was varied in the range from 0.3 to 1.8 mm depending on the number of scintillator layers; it was limited by the total detector thickness. A method for manufacturing and gluing such scintillation detectors was described. The first results of testing neutron counters with different numbers of scintillator layers were presented. When using two scintillator layers, the efficiency of this neutron detector type was 42%. With an increase in the number of scintillator layers to five, the efficiency increased to 90%.

Keywords: neutrons, detectors, silicon photomultipliers, scintillator, Geiger avalanche photodiodes, multi-layer detector, scintillation detector, organic light guide.