



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01T 3/06 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020140943, 11.12.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
11.12.2020

Дата регистрации:
16.07.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 11.12.2020

(45) Опубликовано: 16.07.2021 Бюл. № 20

Адрес для переписки:

119180, Москва, Старомонетный пер., 26, АО
"Наука и инновации", для Снегова К.Г.

(72) Автор(ы):

Басков Петр Борисович (RU),
Богданов Федор Алексеевич (RU),
Бондаренко Сергей Алексеевич (RU),
Громушкин Дмитрий Михайлович (RU),
Ижбулякова Зарина Тагировна (RU),
Коновалова Алена Юрьевна (RU),
Кузьменкова Полина Сергеевна (RU),
Намакшинов Артур Азарович (RU),
Петрухин Анатолий Афанасьевич (RU),
Хохлов Семен Сергеевич (RU),
Шульженко Иван Андреевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество "Наука и инновации"
(RU)

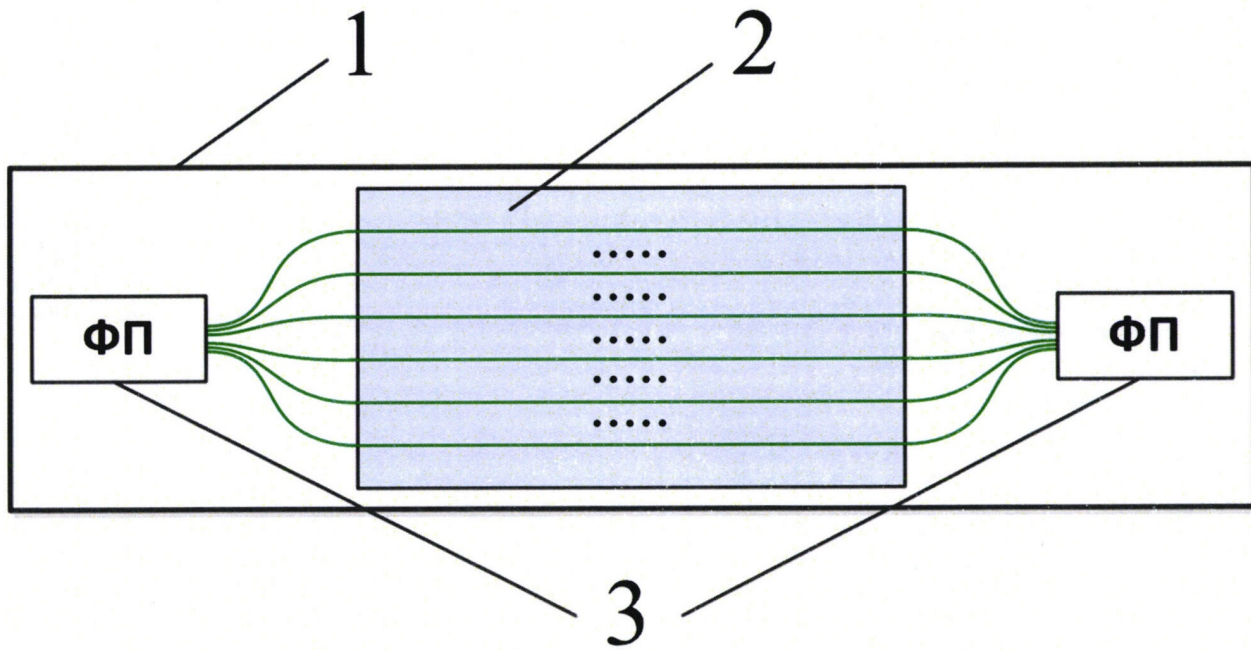
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RT Kouzes, JH Ely et al. "Full Scale
Coated Fiber Neutron Detector Measurements".
March 17, 2010. PNNL-19264. Pp 3-5. US
2018172852 A1, 21.06.2018. RU 2351954 C2,
10.04.2009. SU 1145778 A1, 10.05.1996.

(54) ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ С ПОЛИСЛОЙНОЙ СТРУКТУРОЙ

(57) Реферат:

Изобретение относится к детекторам нейтронного излучения. Детектор состоит из светоизолированного корпуса в виде параллелепипеда, в котором закреплен плоский сцинтилляционный модуль, оптические волокна которого противоположными торцами соединены с двумя фотоприемниками. Сцинтилляционный модуль имеет полислойную структуру и состоит из семи слоев, центральный слой изготовлен из материала, содержащего ${}^6\text{Li}$, сверху и снизу к

центральному слою примыкают два сцинтилляционных слоя из $\text{ZnS}(\text{Ag})$ толщиной 25-30 мкм, к сцинтилляционным слоям примыкают светособирающие слои, состоящие из размещенных плотно друг к другу оптических волокон, зафиксированных оптически прозрачным эластичным полимером, к светособирающим слоям примыкают светоотражающие слои. Технический результат – повышение эффективности регистрации нейтронов. 6 з.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг. 1

RU 2751761 C1

RU 2751761 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01T 3/06 (2021.02)

(21)(22) Application: **2020140943, 11.12.2020**

(24) Effective date for property rights:
11.12.2020

Registration date:
16.07.2021

Priority:

(22) Date of filing: **11.12.2020**

(45) Date of publication: **16.07.2021** Bull. № 20

Mail address:

**119180, Moskva, Staromonetnyj per., 26, AO
"Nauka i innovatsii", dlya Snegova K.G.**

(72) Inventor(s):

**Baskov Petr Borisovich (RU),
Bogdanov Fedor Alekseevich (RU),
Bondarenko Sergej Alekseevich (RU),
Gromushkin Dmitrij Mikhajlovich (RU),
Izhbulyakova Zarina Tagirovna (RU),
Konovalova Alena Yurevna (RU),
Kuzmenkova Polina Sergeevna (RU),
Namakshinov Artur Azarovich (RU),
Petrukhin Anatolij Afanasevich (RU),
Khokhlov Semen Sergeevich (RU),
Shulzhenko Ivan Andreevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Aksionernoe obshchestvo "Nauka i innovatsii"
(RU)**

(54) **NEUTRON DETECTOR WITH POLYLAYER STRUCTURE**

(57) Abstract:

FIELD: neutron radiation detectors.

SUBSTANCE: invention relates to detectors of neutron radiation. The detector consists of a light-insulated casing in the form of a parallelepiped, in which a flat scintillation module is fixed, the optical fibers of which are connected by opposite ends to two photodetectors. The scintillation module has a multilayer structure and consists of seven layers, the central layer is made of a material containing ⁶Li, two

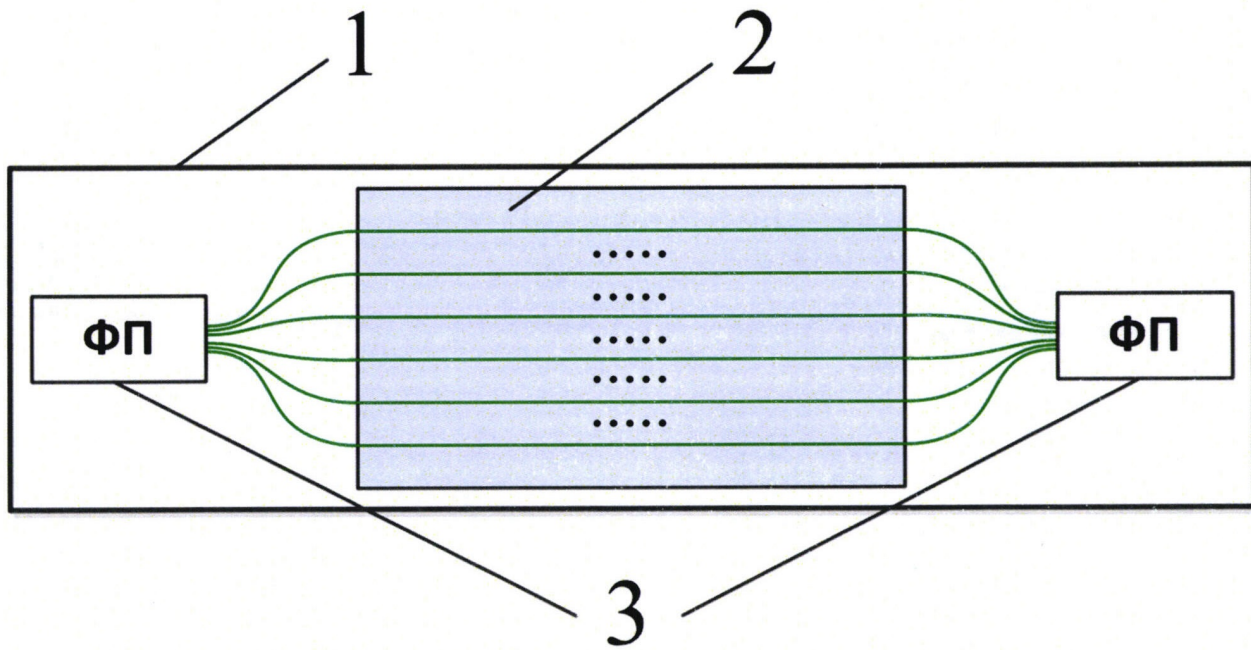
scintillation layers of ZnS(Ag) with a thickness of 25-30 microns are adjacent to the top and bottom of the central layer, light-collecting layers are adjacent to the scintillation layers, consisting of closely spaced optical fibers fixed with an optically transparent elastic polymer, light-reflecting layers adjoin the light-collecting layers.

EFFECT: invention increases the efficiency of neutron registration.

6 cl, 2 dwg

RU 2 751 761 C1

RU 2 751 761 C1



Фиг. 1

Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к детекторам нейтронного излучения, преимущественно тепловых нейтронов, и может быть использовано: для регистрации слабых, на уровне естественного фона, потоков нейтронов; для измерения нейтронного излучения на объектах атомной промышленности, автоматических и обитаемых космических аппаратах; для контроля перемещения источников нейтронного излучения; для разведки нефтяных месторождений; для прикладных задач медицинской физики, а также для регистрации адронной компоненты вторичных космических лучей на поверхности Земли.

Уровень техники

На сегодняшний день известно большое количество детекторов нейтронного излучения, отличающихся как по агрегатному состоянию рабочего вещества, так и по основному элементу для захвата нейтронов (^3He , ^6Li , ^{10}B , ^{157}Gd , ^{235}U). Среди разнообразия схем детекторов чаще других встречаются варианты, в которых в качестве рабочего вещества выступает неорганический сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с добавлением молекул, содержащих ^6Li или ^{10}B (LiF , Li_2O , B_2O_3 , и др.). В результате захвата нейтрона происходят реакции $^6\text{Li}+n \rightarrow ^4\text{He}+^3\text{H}$ или $^{10}\text{B}+n \rightarrow ^7\text{Li}+^4\text{He}$. Продукты этих реакций ионизируют молекулы сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})$. Вследствие ионизации молекулы испускают фотоны видимой области спектра. Испущенные фотоны попадают на входное окно фотоприемника (в различных вариантах в качестве фотоприемника выступают фотодиоды, вакуумные или кремниевые фотоэлектронные умножители), на выходе которых формируется электрический сигнал.

При этом использование ^6Li по сравнению с ^{10}B , имеет несколько преимуществ. Во-первых, в реакции с ^6Li выделяется больше энергии, чем в реакции с ^{10}B (4.8 МэВ против 2.8 МэВ). Во-вторых, продукты реакции при захвате нейтрона ^6Li гораздо ближе друг к другу по массе, чем ядра, возникающие в реакции с ^{10}B ($M(^4\text{He}): M(^3\text{H})=4:3$, в то время как $M(^7\text{Li}): M(^4\text{He})=7:4$). Вследствие равенства импульсов продуктов реакции это приводит к обратному соотношению кинетических энергий (в реакции с литием: $T(^4\text{He}): T(^3\text{H})=3:4$, в реакции с бором: $T(^7\text{Li}): T(^4\text{He})=4:7$). Таким образом, если, в силу случайных процессов, наиболее легкое ядро (^3H - в реакции с ^6Li или ^4He - в реакции с ^{10}B) вылетает за пределы сцинтиллятора, минимальное энерговыделение в $\text{ZnS}(\text{Ag})$ составит 43% в литиевой реакции и только 36% в реакции с бором. В-третьих, в реакции с ^{10}B в 93% случаев ^7Li образуется в возбужденном состоянии, что еще больше снижает кинетическую энергию продуктов реакции. Кроме того, гамма-квант, испущенный возбужденным ядром $^7\text{Li}^*$, может вообще не провзаимодействовать со сцинтиллятором и, тем самым, снизить энерговыделение.

Использование в качестве сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})$ обуславливается высоким световыходом (~35000 фотонов/МэВ). Однако использование данного сцинтиллятора осложняется тем, что $\text{ZnS}(\text{Ag})$ не прозрачен к собственному излучению: длина ослабления света зависит от длины волны и составляет 25-100 мкм.

Таким образом, в большей части детекторов, спроектированных на основе сцинтиллятора $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с добавлением ^6Li или ^{10}B , приходится решать задачу достижения максимального светосбора при минимальной толщине сцинтиллятора. При этом

минимальная толщина сцинтиллятора ограничивается пробегом продуктов реакции - максимальный пробег 30 мкм наблюдается у ${}^3\text{H}$ в реакции с ${}^6\text{Li}$. Одним из путей решения данной задачи является использование мелких, от 100 мкм до 1 мм, гранул $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с добавлением ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$, светосбор с которых осуществляется напрямую или с использованием различных спектросмещающих или светособирающих пластин, призм или оптических волокон.

Из уровня техники известны устройства ПРИЗМА-32 и УРАН для регистрации нейтронов в составе широких атмосферных ливней (статьи в периодических изданиях D.M. Gromushkin, V.V. Alekseenko, A.A. Petrukhin, O.B. Shchegolev, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, V.I. Volchenko, I.I. Yashin. "The ProtoPRISMA array for EAS study: first results", Journal of Physics: Conference Series, 409, 012044, (2013) и D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, S.S. Khokhlov, R.P. Kokoulin, K.G. Kompaniets, A.A. Petrukhin, I.A. Shulzhenko, Yu.V. Stenkin, I.I. Yashin, K.O. Yurin "The array of scintillation detectors with natural boron for EAS neutrons investigations", Journal of Instrumentation, Vol. 12, Issue 6 (2017)). Детекторы установок ПРИЗМА-32 и УРАН состоят из цилиндрических светонепроницаемых корпусов диаметром 720 мм и высотой 570 мм, на дне которых с внутренней стороны располагается сцинтиллятор в виде гранул $\text{ZnS}(\text{Ag})$ размером 0.1-0.8 мм, в состав которого добавлен ${}^6\text{Li}$ (установка ПРИЗМА-32) или ${}^{10}\text{B}$ (УРАН), причем в установке ПРИЗМА-32 гранулы $\text{ZnS}(\text{Ag})$ закреплены на подложке из белой бумаги при помощи технологии ламинирования, а в установке УРАН гранулы нанесены на белую подложку в составе застывающего силиконового компаунда. В верхней части корпуса с внутренней стороны закреплен фотоэлектронный умножитель ФЭУ-200, плоскость фотокатода которого параллельна плоскости сцинтиллятора. Для улучшения светосбора внутри корпуса имеется светособирающий усеченный конус, основание которого окружает сцинтиллятор, а верхняя часть обертывает фотокатод ФЭУ. Технический результат этих устройств - большая площадь регистрации нейтронов.

Недостатками данных устройств являются: во-первых, невысокий светосбор, поскольку фотоны претерпевают многократное отражение от стенок светособирающих конусов, вследствие чего часть фотонов поглощается, не достигнув фотоприемника; во-вторых, использование разноразмерных гранул, которые увеличивают разброс световых выходов после захвата нейтрона, поскольку в случае реакции внутри гранулы на поверхность выходят не все фотоны сцинтилляционной вспышки, а в случае реакции близко к поверхности гранулы, существует вероятность вылета одного из образовавшихся ядер за ее пределы, что снижает энерговыделение.

Из патента RU 2570588, 12.11.2013, известен детектор нейтронов, в корпусе которого размещены композиционный сцинтиллятор, спектросмещающие волокна и, по крайней мере, один фотоприемник, с которым оптически соединены торцы спектросмещающих волокон. При этом композиционный сцинтиллятор выполнен в виде отдельных гранул, которые расположены, по крайней мере, в один слой вокруг спектросмещающих волокон. Технический результат - повышение эффективности регистрации нейтронов. Недостатком данного изобретения является снижение вероятности регистрации в случае, если захват нейтронов произошел близко к краю гранулы и один из продуктов реакции вылетел из сцинтиллятора.

Известно устройство для преобразования ионизирующего излучения (патент RU 54438 U1, 27.06.2006), содержащее спектросмещающие элементы в виде лент и оптоволокно, на концах которого установлены фотоприемники, а слой порошкового люминофора нанесен на поверхность одной из лент или введен в ее состав. Для

регистрации тепловых нейтронов слой порошкового люминофора выполнен из светосостава ${}^6\text{LiFZnS:Ag}$, или ${}^{157}\text{Cd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, или ${}^{157}\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, или ${}^{10}\text{BZnS:Ag}$; для регистрации рентгеновского и гамма излучений слой порошкового люминофора выполнен из светосостава ZnS:Ag или $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$; для регистрации быстрых нейтронов слой порошкового люминофора выполнен из светосостава ZnS(Ag) или $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S(Tb)}$ с водородосодержащим веществом с объемным содержанием светосостава не менее 5% и не более 14%. Техническим результатом полезной модели является повышение пространственного разрешения, расширение функциональных возможностей экрана, одновременная регистрация различных видов проникающего излучения: быстрых нейтронов, и/или тепловых нейтронов, и/или рентгеновских и гамма лучей, повышение эффективности регистрации за счет протяженности детектора в направлении падающего излучения. Недостатком данного устройства является снижение эффективности регистрации сцинтилляционных вспышек в случае вылета одного из продуктов ядерной реакции за пределы сцинтиллятора.

Наиболее близким к заявленному решению является окруженный оптоволоконном нейтронный детектор, описанный в отчете Тихоокеанской северозападной национальной лаборатории PNNL США («Full Scale Coated Fiber Neutron Detector Measurements». RT Kouzes, JH Ely, LE Erikson, WJ Kernan, DC Stromswold, ML Woodring, March 17, 2010. PNNL-19264). Детектор содержит светоизолированный корпус в виде параллелепипеда, в котором закреплен плоский сцинтилляционный модуль, оптические волокна которого противоположными торцами соединены с двумя фотоприемниками. Сцинтилляционный модуль выполнен из пресованных гранул ZnS(Ag) с добавлением ${}^6\text{Li}$. С двух сторон к сцинтиллятору прикреплены размещенные плотно друг к другу оптические волокна. Технический результат - увеличение площади светособирающих элементов. Недостатком данного устройства является низкая эффективность, обусловленная пространственной неоднородностью светосбора в случаях, когда реакция захвата нейтрона происходит близко к поверхности сцинтиллятора и одно из ядер после реакции покидает сцинтиллятор, не истратив всю свою энергию на ионизацию.

Раскрытие сущности изобретения

Технический результат изобретения заключается в увеличении эффективности регистрации нейтронов.

Указанный технический результат достигается за счет того, что детектор нейтронов с полислоистой структурой содержит светоизолированный корпус в виде параллелепипеда, в котором закреплен плоский сцинтилляционный модуль, оптические волокна которого противоположными торцами соединены с двумя фотоприемниками, при этом сцинтилляционный модуль имеет полислоистую структуру и состоит из семи слоев, центральный слой изготовлен из материала, содержащего ${}^6\text{Li}$, сверху и снизу к центральному слою примыкают два сцинтилляционных слоя из ZnS(Ag) толщиной 15-30 мкм, к сцинтилляционным слоям примыкают светособирающие слои, состоящие из размещенных плотно друг к другу оптических волокон, зафиксированных оптически прозрачным эластичным полимером, к светособирающим слоям примыкают светоотражающие слои.

В частном случае в качестве материала для центрального слоя сцинтилляционного модуля используют LiF толщиной 30-50 мкм.

В другом частном случае в качестве материала для центрального слоя сцинтилляционного модуля используют Li_2O толщиной 20-40 мкм.

В частном случае в качестве материала для светоотражающих слоев сцинтилляционного модуля используют материал с диффузным отражением.

В другом частном случае в качестве материала для светоотражающих слоев сцинтилляционного модуля используют материал с зеркальным отражением.

5 В частном случае в качестве фотоприемников используют фотоэлектронные умножители.

В другом частном случае в качестве фотоприемников используют кремниевые фотоэлектронные умножители.

Краткое описание чертежей

10 На Фиг. 1 показана принципиальная схема детектора нейтронов с полислоистой структурой. Цифрами на Фиг. 1 обозначены:

- 1 - корпус детектора;
- 2 - сцинтилляционный модуль;
- 3 - фотоприемники.

15 На Фиг. 2 показана принципиальная схема сцинтилляционного модуля в разрезе.

Цифрами на Фиг. 2 обозначены:

- 4 - центральный слой;
- 5 - сцинтилляционные слои;
- 6 - светособирающие слои;
- 20 7 - светоотражающие слои.

Осуществление изобретения

Как показано на Фиг. 1, в соответствии с настоящим изобретением, детектор содержит светоизолированный корпус 1, внутри которого закреплен плоский сцинтилляционный модуль 2. Торцы оптических волокон сцинтилляционного модуля соединены с входными окнами закрепленных в корпусе фотоприемников 3. Сцинтилляционный модуль в разрезе представлен на Фиг. 2. Модуль состоит из семи слоев. К центральному слою 4 сверху и снизу примыкают сцинтилляционные слои 5 толщиной 15-25 мкм. К сцинтилляционным слоям примыкают светособирающие слои с оптическими волокнами 6. Светособирающие слои состоят из размещенных плотно друг к другу оптических волокон, зафиксированных оптически прозрачным эластичным полимером. К светособирающим слоям примыкают светоотражающие слои 7.

Пример конкретной реализации изобретения. Корпус детектора 1 имеет размеры $600 \times 200 \times 50 \text{ мм}^3$ и изготовлен из черного пластика толщиной 4 мм. С одной из сторон у корпуса предусмотрена крышка размером $600 \times 200 \text{ мм}^2$, соединяющаяся с корпусом через световой замок и фиксируемая при помощи защелок, что обеспечивает светоизоляцию.

К нижней плоскости корпуса с внутренней стороны с помощью прижимных полос крепится сцинтилляционный модуль 2 размером $160 \times 160 \times 5 \text{ мм}^3$. Нижний светоотражающий слой 7 сцинтилляционного модуля изготовлен из диффузно отражающего материала на полимерной основе с коэффициентом отражения 0.96. На нижнем слое плотно друг к другу параллельно длинной стороне корпуса размещены 160 оптических волокон диаметром 1 мм. Волокна имеют различную длину от 300 мм в центре, до 480 мм на периферии сцинтилляционного модуля. Различная длина позволяет собрать торцы волокон в два пучка. Волокна заливаются тонким слоем двухкомпонентного силиконового прозрачного герметика, который после затвердевания вместе с оптоволоконными образует светособирающий слой 6. На светособирающий слой наносится сцинтилляционный слой 5 из прессованных мелких, менее 10 мкм, гранул

ZnS(Ag). На сцинтилляционный слой наносится центральный слой 4 толщиной 35 мкм из LiF, предварительно обогащенного изотопом ${}^6\text{Li}$ до 90%. На центральный слой наносится еще один сцинтилляционный слой 5 из ZnS(Ag). Сверху на сцинтилляционном слое раскладываются оптические волокна, которые заливаются тонким слоем двухкомпонентного силиконового прозрачного герметика, после застывания которого образуется второй светособирающий слой 6. Сверху на светособирающий слой накладывается диффузно отражающий материал на полимерной основе - светоотражающий слой 7. Общая толщина сцинтилляционного модуля составляет 5 мм.

В противоположных концах корпуса закреплены два фотоприемника 3. В данном случае в качестве фотоприемников используются фотоумножители ФЭУ-115. К фотокатоду каждого ФЭУ через оптический контакт примыкают пучки оптических волокон сцинтилляционного модуля. Анодные сигналы ФЭУ выведены на входы цифрового осциллографа.

Тепловой нейтрон попадает в детектор, проходит через сцинтилляционный модуль и захватывается в его центральном слое ядром ${}^6\text{Li}$. Образовавшиеся в результате реакции ядра ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ разлетаются в разные стороны, выходят из центрального слоя с малыми потерями энергии (концентрация электронов и ионизационные потери в LiF примерно в 8 раз меньше, чем в ZnS) и попадают в различные сцинтилляционные слои. В сцинтилляционных слоях ядро ${}^4\text{He}$ пробегает до 8 мкм и вызывает вспышку света до 70000 фотонов, ядро ${}^3\text{H}$ пробегает до 30 мкм и дает вспышку до 90000 фотонов. Толщины сцинтилляционных слоев достаточно, чтобы остановить продукты реакции, но при этом поглотить как можно меньше излученных фотонов. Благодаря малой толщине сцинтилляционных слоев и большой площади оптических волокон, светособирающие слои транспортируют на входные окна фотоумножителей по 250 фотонов, что позволяет получить на выходе каждого ФЭУ сигналы величиной 40 фотоэлектронов.

Сигналы с выходов ФЭУ поступают на входы цифрового осциллографа, подключенного к персональному компьютеру. После оцифровки проводится анализ формы сигналов. Наличие сигналов на обоих фотоумножителях и соответствие ожидаемой форме сигналов от нейтрона позволяют сделать вывод о том, что детектор зарегистрировал тепловой нейтрон.

Нейтроны после попадания в детектор взаимодействуют в различных точках центрального слоя, оба продукта реакции преодолевают центральный слой с малыми потерями энергии и попадают в сцинтилляционные слои, что приводит к уменьшению пространственной неоднородности светосбора. Благодаря полислоистой структуре сцинтилляционного модуля эффективность регистрации тепловых нейтронов в данном случае достигает 35%.

Таким образом, предложенное изобретение за счет использования полислоистой структуры сцинтилляционного модуля позволяет регистрировать тепловые нейтроны с высокой эффективностью.

(57) Формула изобретения

1. Детектор нейтронов с полислоистой структурой, содержащий светоизолированный корпус в виде параллелепипеда, в котором закреплен плоский сцинтилляционный модуль, оптические волокна которого противоположными торцами соединены с двумя фотоприемниками, отличающийся тем, что сцинтилляционный модуль имеет

полислойную структуру и состоит из семи слоев, центральный слой изготовлен из материала, содержащего ${}^6\text{Li}$, сверху и снизу к центральному слою примыкают два сцинтилляционных слоя из $\text{ZnS}(\text{Ag})$ толщиной 15-30 мкм, к сцинтилляционным слоям примыкают светособирающие слои, состоящие из размещенных плотно друг к другу оптических волокон, зафиксированных оптически прозрачным эластичным полимером, к светособирающим слоям примыкают светоотражающие слои.

2. Детектор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве материала для центрального слоя сцинтилляционного модуля используют LiF толщиной 30-50 мкм.

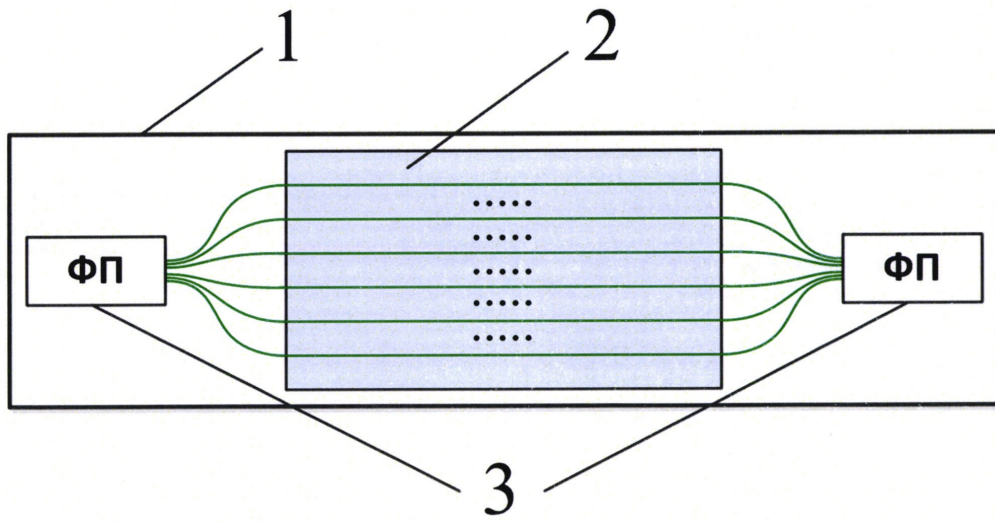
3. Детектор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве материала для центрального слоя сцинтилляционного модуля используют Li_2O толщиной 20-40 мкм.

4. Детектор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве материала для светоотражающих слоев сцинтилляционного модуля используют материал с диффузным отражением.

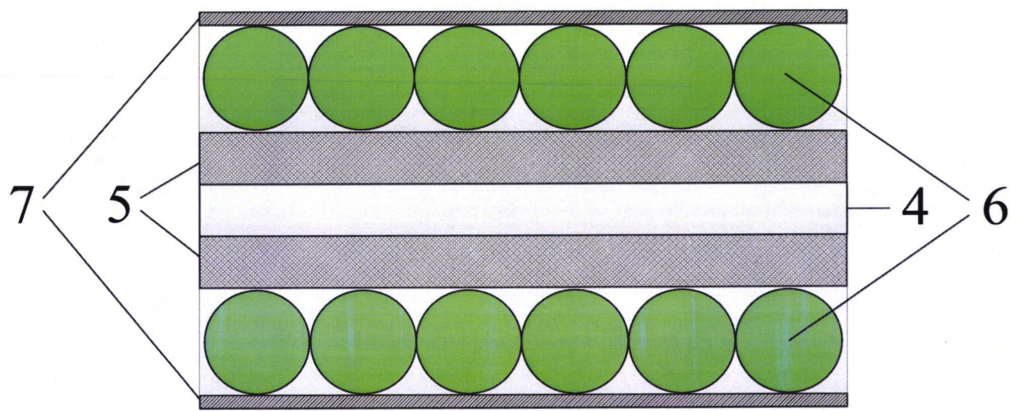
5. Детектор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве материала для светоотражающих слоев сцинтилляционного модуля используют материал с зеркальным отражением.

6. Детектор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве фотоприемников используют фотоэлектронные умножители.

7. Детектор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве фотоприемников используют кремниевые фотоэлектронные умножители.



Фиг. 1



Фиг. 2