

УДК 539.1.074.823

© С. Х. Караевский, С. И. Поташев, Ю. М. Бурмистров,
А. И. Драчев, А. А. Афонин, В. И. Разин

ДВУМЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ТЕПЛОВЫХ И ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ РАЗМЕРАМИ 120 × 120 мм И 380 × 380 мм С АКТИВНЫМ СЛОЕМ ИЗ БОРА-10

Создан двумерный детектор медленных нейтронов на основе пропорциональной газовой камеры с активным слоем из ^{10}B форматом 120 × 120 мм и спроектирован многослойный аналогичный детектор 380 × 380 мм. Соотношение эффект./фон < 10^{-5} . Экспериментальное амплитудное разрешение 15 %, координатное разрешение ~2.5 мм. Эффективность регистрации детектора, состоящего из 10 слоев ^{10}B , оценивается как 41 % (при длине волны нейтрона $\lambda \sim 1.82 \text{ \AA}$) и 62 % (при $\lambda \sim 8 \text{ \AA}$). Создано оборудование для вакуумного литья и сборки деталей рам-электродов, станок для намотки проволоки, натяжения пленок и фольги на рамы.

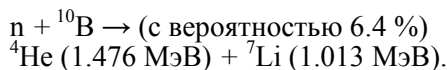
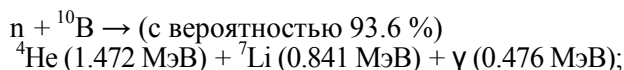
Кл. сл.: детектор, нейтрон, бор-10, двумерный, газовый

ВВЕДЕНИЕ

Двумерный детектор медленных нейтронов на основе твердого ^{10}B и пропорциональной камеры может использоваться в качестве монитора нейтронного потока или детектора для установки малоуглового рассеяния для исследования наноструктур при длине волны нейтронов от 0.9 Å [1], а при длине волны 8 Å — для исследования структуры биомолекул [2]. Такой детектор является альтернативой детекторам нейтронов на основе дорогостоящего изотопа гелий-3, обладает большей стабильностью параметров. Разделение функций конвертирования нейтрона в заряженные частицы с помощью слоя бора-10 и последующего детектирования этих частиц решает не только проблему стабильности газовой смеси, но и позволяет работать при нормальном давлении дешевых газов. Локализация точки взаимодействия нейтрона в плоскости слоя бора-10 позволяет достичь высоких координатного и временного разрешений. Недавно было заявлено о создании детектора с многослойной структурой ^{10}B [3] с форматом активной площади 200 × 200 мм, однако реально был построен детектор из 3 слоев с эффективностью 8 % при $\lambda = 1.82 \text{ \AA}$. Преимуществом детекторов на основе твердого ^{10}B является малая толщина входного окна, долговечность, возможность применять его в экспериментах с холодными нейтронами [4].

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ. ДЕТЕКТОР РАЗМЕРАМИ 120 × 120 мм

Детектирование основано на регистрации заряженных частиц ^4He и ^7Li , вылетающих из ядерных реакций взаимодействия тепловых нейтронов с ядрами ^{10}B с сечением 3837 бн:



Конструкция ионизационного детектора размером 120 × 120 мм представлена на рис. 1. Передний катод представляет из себя 2 мм стеклянный диск с нанесенным на него 3 мкм слоем ^{10}B и слоем алюминия толщиной 0.1 мкм. Анод состоит из массива проволочек из сплава ВР20 с шагом намотки 2 мм. Задний катод изготовлен из стеклотекстолита и имеет изолированные медные полоски шириной 2 мм. Расстояние между анодом и каждым катодом равно 2 мм. Проволочки анода и полоски заднего катода взаимно перпендикулярны друг другу и соединены между собой через сопротивления величиной 20 Ом. Для определения координаты x (или y) применяется метод деления заряда из соотношения амплитуд сигналов X_1 и X_2 (или Y_1 и Y_2) с двух концов распределенного сопротивления. Потенциал анода составляет от +620 до +920 В для газовой смеси $\text{Ag} + 25\% \text{ CO}_2 + 0.3\% \text{ CF}_3\text{Br}$ при нормальных условиях.

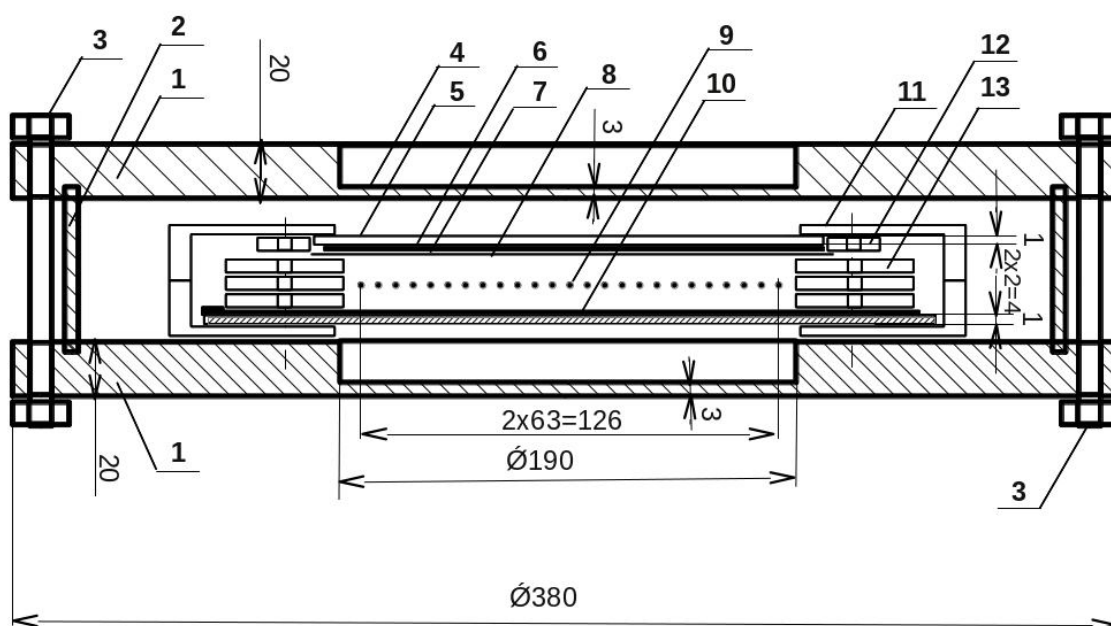


Рис. 1. Устройство пропорциональной камеры.

1 — крышки корпуса; 2 — боковая стенка корпуса; 3 — болты и гайки; 4 — окно; 5 — пластина из стекла; 6 — слой бора-10; 7 — слой полиимиды; 8 — слой алюминия; 9 — высоковольтный сигнальный проволочный анод координаты x ; 10 — сигнальный полосковый катод координаты y ; 11 — фторопластовый кожух детектирующего элемента; 12 — фиксатор стеклянной пластины; 13 — несущий элемент проволоки

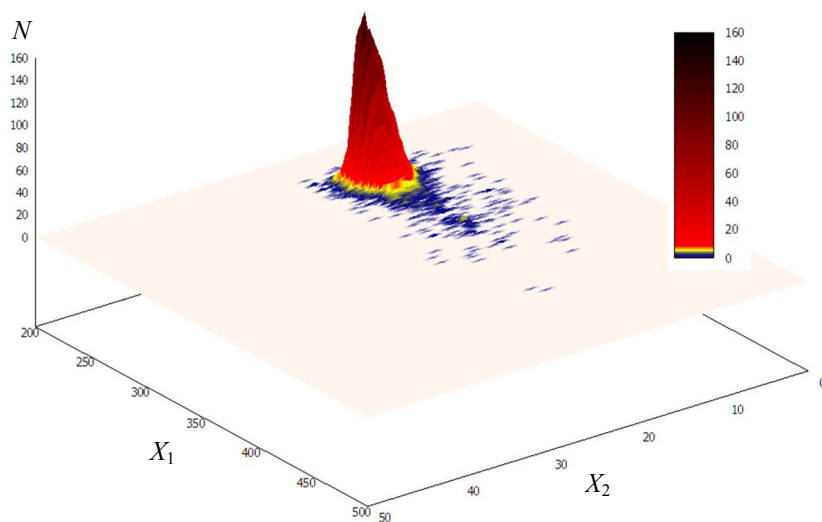


Рис. 2. Корреляции амплитуд сигналов X_1 и X_2 при 700 В

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ С ДЕТЕКТОРОМ 120 × 120 мм

Детектор испытывался на компактном источнике нейтронов ИЯИ РАН на базе ускорителя электронов ЛУЭ-8 с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов $\sim 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Детектор

был размещен под углом 60° к пучку на расстоянии ~ 6 м от бериллиевой мишени.

На рис. 2 представлена двумерная диаграмма корреляций между амплитудами сигналов X_1 и X_2 при напряжении питания $U = 700$ В. Спектр суммы амплитуд X_1 и X_2 , из которого получено амплитудное разрешение $\sim 15\%$, приведен на рис. 3.

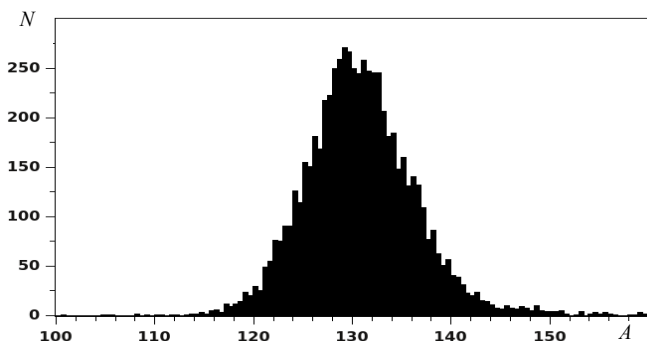


Рис. 3. Спектр амплитуды при 700 В

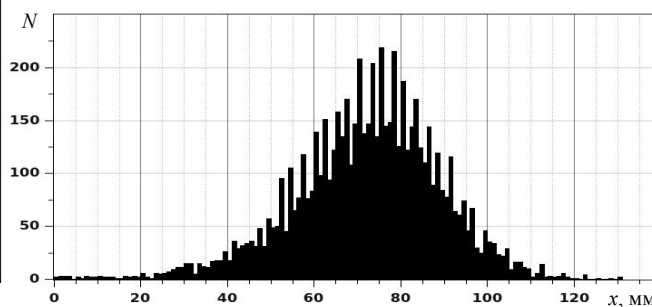
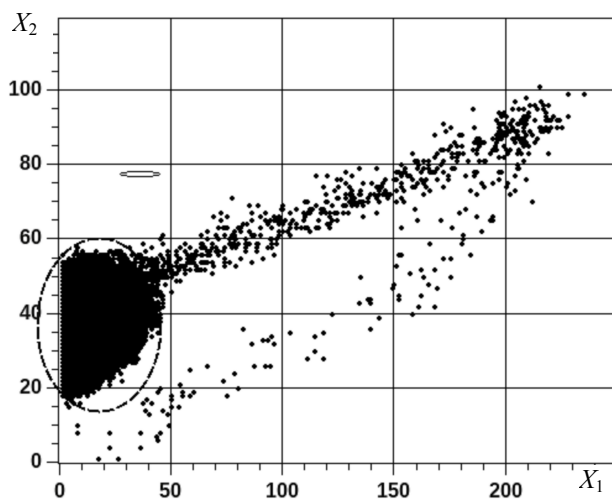


Рис. 4. Координатный спектр при 700 В

Табл. 1. Расчетные значения эффективности детектора

Порог, МэВ	$\lambda = 1.82 \text{ \AA}$	$\lambda = 4 \text{ \AA}$	$\lambda = 8 \text{ \AA}$	$\lambda = 16 \text{ \AA}$
0.01	6.2 %	8.8 %	11.6 %	15.0 %
0.2	4.5 %	6.3 %	8.2 %	10.5 %

Рис. 5. Корреляции амплитуд X_1 и X_2 при 650 В

Спектр координаты x показан на рис. 4. Структура максимумов и минимумов отражает изменение эффективности вблизи проволочек и между проволочками при напряжении $U = 700 \text{ В}$. Из факта наблюдения этой структуры получаем оценку координатного разрешения $\sim 2.5 \text{ мм}$. Скорость счета в детекторе при максимальном

токе пучка $\sim 40 \text{ мкА}$ составляла $\sim 25 \text{ с}^{-1}$. Из телесного угла детектора и величины плотности потока нейтронов получена оценка эффективности детектора $\sim 4 \%$. Сравнения измеренных и расчетных амплитудных спектров с учетом толщин слоев $^{10}\text{В}$ и алюминия позволяет определить порог регистрации, составивший величину 0.2 МэВ . В табл. 1 приведены расчетные значения эффективности детектора при двух порогах регистрации.

В другом эксперименте перед детектором была установлена кадмиевая диафрагма толщиной 2 мм таким образом, что правый край был закрыт вдоль оси x . Ширина открытого окна составляла 7.5 см . На рис. 5 представлена диаграмма корреляций между амплитудами сигналов X_1 и X_2 при напряжении $U = 650 \text{ В}$. Главная часть событий 99.99% концентрируется в эллиптическом пунктирном локусе. Для событий, попадающих в этот эллиптический локус, координатный спектр для горизонтальной координаты x представлен на рис. 6. Для тех 0.01% событий вне эллиптического локуса характерны амплитуды, на порядок превышающие амплитуды для событий внутри эллиптического локуса. Как показали измерения в тех же условиях на ускорителе, но без бериллиевой мишени, вклад фоновых событий составил не более 0.001% .

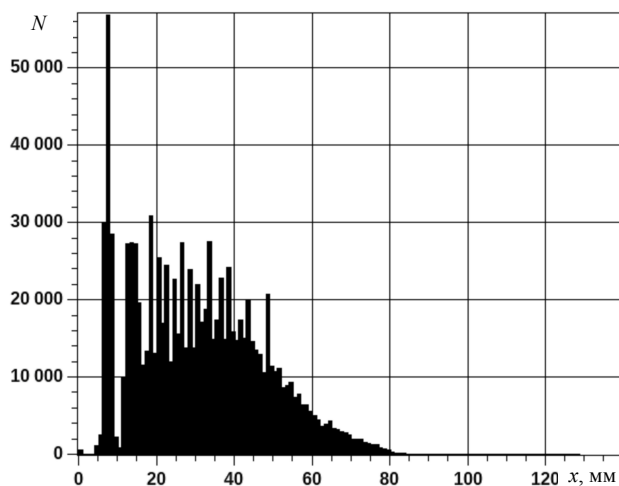


Рис. 6. Координатный спектр при 650 В для событий внутри эллиптического локуса

ПРОЕКТ МНОГОСЛОЙНОГО ДЕТЕКТОРА РАЗМЕРОМ 380 × 380 мм

Вышеописанный детектор является прототипом для многослойного детектора с активными слоями толщиной 2.5 мкм ^{10}B , нанесенными на алюминиевый катод. Конструкция базового модуля

многопроволочной пропорциональной камеры с двумя активными слоями представлена на рис. 7.

Корпус детектора состоит из двух 20 мм дюралюминиевых рам с окном для нейтронов из алюминий-магниевого сплава АМГ6 толщиной 0.5 мм и площадью $(380 \cdot 380) \text{ мм}^2$. Между рамами последовательно расположены:

- алюминиевый катод с 2.5 мкм слоем ^{10}B и с 0.2 мкм слоем алюминия;
- изолирующая рама;
- рама-анод с проволокой толщиной 20 мкм с шагом намотки 2 мм, координата X_1 ;
- рама-катод с проволокой толщиной 50 мкм с шагом намотки 1 мм, координата Y_{12} ;
- рама-анод с проволокой толщиной 20 мкм с шагом намотки 2 мм, координата X_2 ;
- изолирующая рама;
- алюминиевый катод с 2.5 мкм слоем ^{10}B и с 0.2 мкм слоем алюминия.

Все элементы камеры герметизируются с помощью вакуумной резины и стягиваются по периметру болтами.

Аноды состоят из 192 параллельных и изолированных друг от друга проволочек диаметром 20 мкм из вольфрам-рениевого сплава, покрытого золотом, и крайних охранных проволочек толщиной 50, 80 и 200 мкм, расположенных с шагом 2 мм.

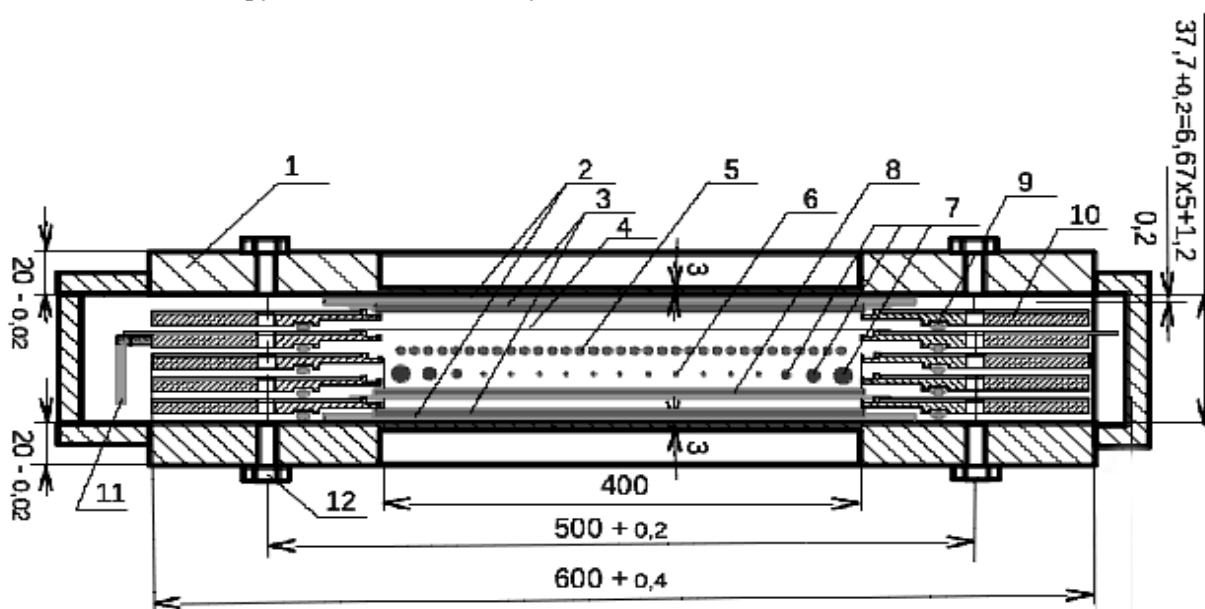


Рис. 7. Устройство ионизационной камеры.

1 — несущая рама; 2 — изоляторы из полиимида; 3 — верхний катод из алюминия со слоем бора-10, покрытый алюминием; 4 — высоковольтный проволочный анод координаты X_1 ; 5 — сигнальный проволочный катод координаты Y_{12} ; 6 — высоковольтный проволочный анод координаты X_2 ; 7 — полевые проволочки диаметром 50, 80 и 200 мкм для плавного спада поля на краях; 8 — нижний катод из алюминия со слоем бора-10 покрытый алюминием; 9 — резиновое уплотнение; 10 — рама из кварца и компаунда; 11 — плата с элементами задержки и предварительным усилителем; 12 — болт и гайка

Центральный катод, расположенный в середине сборки камеры, состоит из электрически разъемных 192 пар проволочек диаметром 50 мкм из покрытой золотом бериллиевой бронзы. Шаг проволочек равен 1 мм. Проволочки анодов перпендикулярны проволочкам катода. Слои бора-10 направлены внутрь сборки электродов. Плотность газа внутри камеры выбирается так, чтобы пробег вторичных заряженных частиц не превышал зазор между центральным и периферийными катодами. Для увеличения суммарной эффективности в детекторе размещают последовательно несколько базовых модулей.

Проволочки каждой рамы соединены между собой через дискретные линии задержки величиной 1.25 нс, состоящие из дискретных индуктивностей и емкостей. Таким образом, общая задержка сигнала каждого анода и катода составляет 239 нс. Сигналы с двух концов линии задержки каждого анода и центрального катода поступают на входы усилителей. Импульс триггера события запускается при превышении порога дискриминатора сигналом на выходе предварительного усилителя с одного из катодов.

Эффективность регистрации нейтронов зависит только от толщины слоя ^{10}B . Эффективность незначительно падает за счет толщины входного окна и других элементов, находящихся перед активными слоями пропорциональной камеры.

Пространственное разрешение в основном зависит от парциального давления CF_4 . Увеличение парциального давления улучшает разрешение, но и повышает рабочее напряжение питания камеры. Зазор между анодом и катодом составляет 6.67 мм. Объем газа внутри рам равен 4.27 л.

СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Структурная схема системы сбора данных на основе трех аналого-цифровых сигнальных процессоров DT5720 фирмы CAEN изображена на рис. 8. Первый и второй модули 13 (DT5720-0) и 14 (DT5720-1) работают с минимальным квантом времени 4 нс и используют 2 канала и 4 канала регистрации соответственно. Третий модуль 17 (DT5720-2) использует квант времени 1 мкс и один канал регистрации. Синхроимпульс ускорителя подается на вход "tr-2" и в течение заданного времени в канале "0-2" модуля 17 регистрирует форму каждого импульса, поступающего с выхода формирователя 15, на вход которого поступают сигналы с предварительных усилителей 3 и 4 центрального катода пропорциональной камеры. Импульс с выхода формирователя 15, который свидетельствует о детектировании очередного нейтрона, подается на вход "tr-1" модуля 14

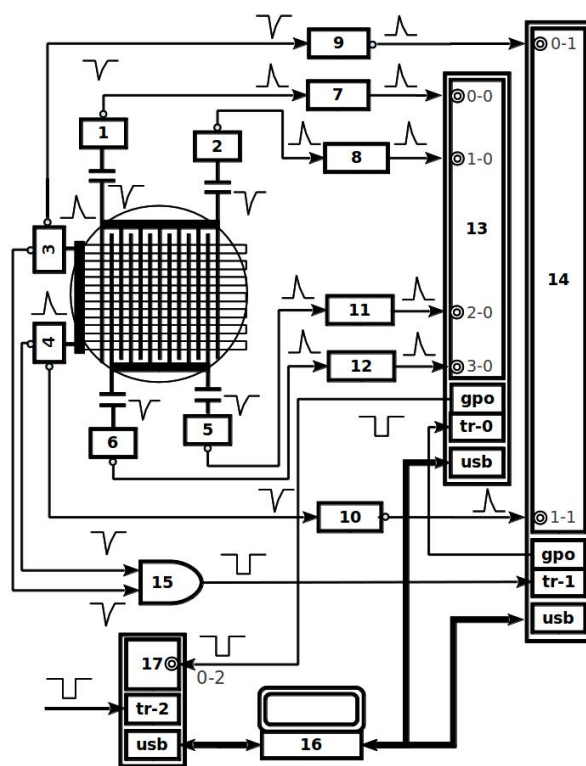


Рис. 8. Структурная схема системы сбора данных с модулями CAEN DT5720

и транслируется в нем на выход "gpo", который подается на вход "tr-0" модуля 13. Сигналы, подаваемые на входы "tr-0" и "tr-1", запускают кодирование формы сигналов, поступающих с двух концов катодной линии задержки для координаты Y через предварительные усилители 3 и 4 и усилители 9 и 10 на входы "0-1" и "1-1" модуля 14. Одновременно эти сигналы запускают кодирование формы сигналов, поступающих с двух концов анодных линий задержки для координаты X_1 через предварительные усилители 1 и 2 и усилители 7 и 8 на входы "0-0" и "1-0" и координаты X_2 через предварительные усилители 5 и 6 и усилители 11 и 12 на входы "2-0" и "3-0" модуля 13 для определения координат этого нейтрона.

Кодирование и запись данных о координатах нейтрона из модулей 13 и 14 в память компьютера осуществляются в течение 300 нс, после чего эти модули приводятся в исходное состояние ожидания поступления новых сигналов на входы "tr-0" и "tr-1".

Кодирование и запись данных о времени пролета нейтрона из модуля 17 в память компьютера осуществляются в течение периода 1000 мкс, после чего этот модуль приводится в исходное состояние

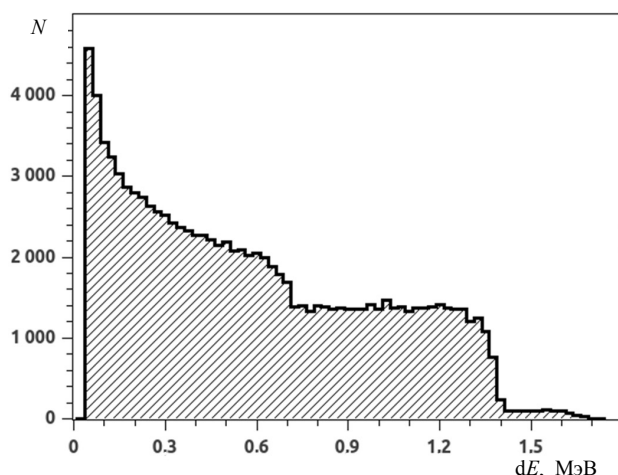


Рис. 9. Распределение по энергии ионизации в газе

ожидания поступления нового сигнала синхроимпульса ускорителя на вход "tr-2".

Из осциллограмм определяются точное положение вершин импульсов, а по ним временные отметки для определения координат X_1 , X_2 и Y и времени пролета нейтрона. За период между синхроимпульсами ускорителя можно зарегистрировать данные о нескольких нейтронах.

Модуль содержит маломощный усилитель и формирователь со следящим порогом.

Параметры усилителя:

- Коэффициент преобразования 0.2 В / 1 мкА
- Динамический диапазон сигналов, мкА от 0.3 до 4
- Время нарастания и время среза выходного импульса 10 нс

Параметры формирователя:

- Диапазон нижнего порога, В $0 \div 0.5$
- Диапазон верхнего порога, В $0 \div 2$
- Временное разрешение выходного импульса 170 пс

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЕТЕКТОРА

На рис. 9 представлен ожидаемый спектр заряженных частиц, вылетающих из слоя толщиной 2.5 мкм кристаллического ^{10}B с плотностью 2.35 г/см³. Необходимо также учитывать ослабление потока нейтронов за счет 2 мм толщины входного окна и первого электрода, которое составляет 2 % при $\lambda = 1.82 \text{ \AA}$, 6.5 % при $\lambda = 4 \text{ \AA}$, 10 % при $\lambda = 8 \text{ \AA}$. Для каждой последующей пары слоев необходимо учитывать ослабление потока нейтронов в 2 мм алюминиевой пластине. Полная эффективность детектора определяется суммарным слоем ^{10}B . В табл. 2 приводим расчетную эффективность для различных длин волн нейтронов. Эффективность детектирования нейтрона зависит только от толщины слоев бора-10, доли вылетевших альфа-частиц и ядер лития-7, а также от эффективности регистрации их пропорциональной камерой. В состав газовой смеси входит Ar, CO₂ и фреон CF₄. Фреон уменьшает пробег вылетающих частиц, что улучшает позиционное разрешение детектора. Кроме того, фреон вместе с CO₂ препятствуют возникновению непрерывного газового разряда. Пространственное разрешение определяется главным образом зазором анод—катод, размерами области ионизации, создаваемой вылетающими частицами, шагом проволок регистрирующих катодов и величиной элементарной дискретной задержки сигнала между соседними проволочными стрипами. Размер области ионизации зависит от пробегов альфа-частицы и ядра лития-7 в газе. Позиционное разрешение за счет геометрии вылета частиц равно 3.4 мм. Распределение координаты представлено на рис. 10. Другой фактор, влияющий на пространственное разрешение, — метод считывания. Если временное разрешение составляет 0.5 нс и задержка между двумя проволочками с шагом 2 мм составляет 1.25 нс, то вклад этого фактора 0.7 мм.

Табл. 2. Расчетная эффективность многослойного детектора (%)

Число слоев	$\lambda, \text{ \AA}$			
	1.82	4	8	16
2	10.0	13.7	17.7	21.1
4	19.0	25.5	32.3	37.7
6	27.1	35.7	44.2	50.9
8	34.4	44.5	54.1	61.2
10	41.0	52.1	62.2	69.4

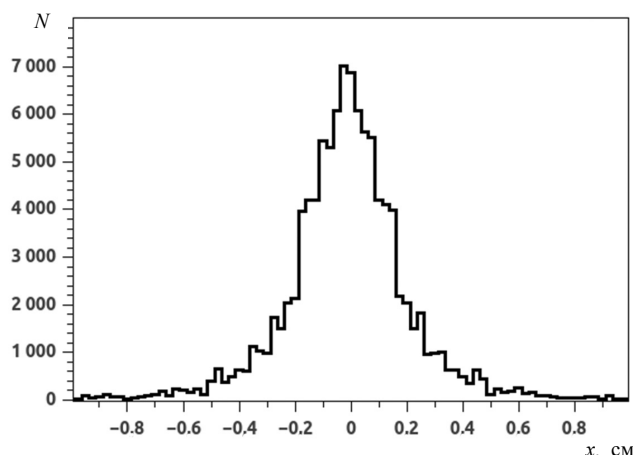


Рис. 10. Распределение по координате центра тяжести лавины

Из двухслойных модулей собирается многослойный детектор. Полная эффективность детектора определяется суммарным слоем ^{10}B . В табл. 3 приводим расчетную эффективность для различных длин волн нейтронов. Созданное в ИЯИ РАН оборудование позволяет создавать большие многослойные позиционно-чувствительные детекторы на основе слоев ^{10}B и ионизационных камер. Рамы камер изготавливаются методом вакуумного литья из термически обработанной смеси кварцевого песка и компаунда в пресс-форме. Точность изготовления не хуже 0.02 мм. Из элементов рамы и печатных плат электродов на монтажном столе склеивается рама. Намотка проволоки на раму осуществляется на станке с точностью шага проволочек 0.02 мм. Слой ^{10}B формируется на поверхности пластины, фольги или полиимидной пленки. Из рам электродов собирается пакет детектора.

Табл. 3. Технические характеристики разрабатываемого детектора

№	Параметр	Величина	Комментарий
1	Активная площадь	$(384 \cdot 384) \text{ мм}^2$	Окно $400 \times 400 \text{ мм}$
2	Толщина слоя ^{10}B	2.5 мкм	Два слоя имеют 5 мкм ^{10}B
3	Рабочий газ	$5(\text{CF}_4) : 4(\text{Ar}) : 1(\text{CO}_2)$	Общее давление 1 бар
4	Пространственное разрешение	3.5 мм	За счет физической неопределенности — 3.4 мм, за счет метода считывания — 1 мм
5	Эффективность регистрации нейтронов детектором из 2 слоев	10.3 % при $\lambda = 1.82 \text{ \AA}$; 14.7 % при $\lambda = 4 \text{ \AA}$; 19.6 % при $\lambda = 8 \text{ \AA}$; 25.6 % при $\lambda = 16 \text{ \AA}$	Электронная лавина регистрируется от каждой заряженной частицы с порогом регистрации 50 кэВ
6	Эффективность регистрации нейтронов детектором из 10 слоев	41.0 % при $\lambda = 1.82 \text{ \AA}$; 52.2 % при $\lambda = 4 \text{ \AA}$; 62.2 % при $\lambda = 8 \text{ \AA}$; 69.4 % при $\lambda = 16 \text{ \AA}$	Электронная лавина регистрируется от каждой заряженной частицы с порогом регистрации 50 кэВ
7	Эффективность по γ	< 0.001 %	Измерения с детектором $120 \times 120 \text{ мм}$
8	Катодная проволока	50 мкм	Бериллиевая бронза
9	Анодная проволока	20 мкм	Вольфрам—рений, покрытая золотом
10	Катод	1) 500; 2) 2.5; 3) 0.1 мкм	1) Al; 2) ^{10}B ; 3) Al
11	Расстояние анод—катод	6.67 мм	Катод—анод; анод—дрейфовый электрод
12	Габариты	$650 \times 650 \times 80 (190) \text{ мм}$	Для 2 слоев; в скобках указано для 10 слоев
13	Вес	45 (110) кг	Для 2 слоев; в скобках указано для 10 слоев

ВЫВОДЫ

1. Создан 2D-детектор тепловых и холодных нейтронов на основе слоя ^{10}B и ионизационной камеры размером 120×120 мм.

2. Детектор имеет низкую чувствительность к γ -квантам и быстрым нейтронам. Соотношение эффект./фон $< 10^{-5}$. Амплитудное разрешение $\sim 15\%$, координатное разрешение ~ 2.5 мм.

3. Имеющееся в ИЯИ РАН оборудование позволяет создавать позиционно-чувствительные детекторы тепловых нейтронов на основе слоев ^{10}B с форматом рабочей площади 380×380 мм.

4. Эффективность детектора из 10 слоев ^{10}B будет составлять $\sim 41\%$ при длине волны $1.82 \text{ \AA}$ и до 62% при $8 \text{ \AA}$ с разрешением 4 мм, что соответствует лучшим мировым образцам с рекордной рабочей площадью $(380 \cdot 380) \text{ мм}^2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарнавич В.В., Волегов А.С., Лотт Д., Матаух С., Воробьев А., Олешкевич А., Григорьев С.В. Структурные и магнитные свойства гольмий-иттриевой сверхрешетки // Поверхность. 2014. № 10. С. 19–25.
2. Efremov R., Shiryayeva G., Bueldt G., Islamov A., Kuklin A., Yaguzhinsky L., Fragneto-Cusani G., Gordeliy V. SANS investigations of the lipidic cubic phase behaviour in course of bacteriorhodopsin crystallization // J. of Cryst. Growth. 2005. Vol. 275, no. 1-2. P. e1453–e1459. Doi: 10.1016/j.jcrysgro.2004.11.235.

3. Klein M., Schmidt C.J. CASCADE, neutron detectors for highest count rates in combination with ASIC/FPGA based readout electronics // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. Vol. 628, no. 1. P. 9–18. Doi: 10.1016/j.nima.2010.06.278.
4. Bleuel M., Carpenter J.M., Micklich B.J., Geltenbort P., Mishima K., Shimizu H.M., Iwashita Y., Hirota K., Hino M., Kennedy S.J., Lal J. A small angle neutron scattering (SANS) experiment using very cold neutrons (VCN) // Physica B: Condensed Matter. 2009. Vol. 404, no. 17. P. 2629–2632. Doi: 10.1016/j.physb.2009.06.048.

Институт ядерных исследований РАН, г. Москва
(Караевский С.Х., Поташев С.И., Бурмистров Ю.М.,
Афонин А.А., Разин В.И.)

ОАО ГНЦ РФ ГНИИХТЭОС, г. Москва (Драчев А.И.)

Контакты: Караевский Сергей Харитонович,
karaevsk@inr.ru

Материал поступил в редакцию: 13.01.2017

TWO DIMENSION DETECTORS FOR THERMAL AND COLD NEUTRONS WITH SIZES 120 × 120 mm AND 380 × 380 mm WITH ACTIVE LAYER OF SOLID BORON-10

**S. Kh. Karaevsky¹, S. I. Potashev¹, Yu. M. Burmistrov¹,
A. I. Drachev², A. A. Afonin¹, V. I. Razin¹**

¹*Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow, Russia*

²*The State Scientific Center of RF "State Research Institute
for Chemistry and Technology of Organoelement Compounds"
of the RF Ministry for Industry and Trade, Moscow, Russia*

Two dimension slow neutron detector on base of gaseous chamber with active boron-10 layer of area $(120 \times 120) \text{ mm}^2$ is created and many boron-10 layer detector of area $(380 \times 380) \text{ mm}^2$ is proposed. Effect to background ratio is less than 10^{-5} . Experimental pulse height resolution is equal 15 %, position resolution is approximately 2.5 mm. Efficiency for detector of ten boron-10 layers is evaluated as 41 % ($\lambda \sim 1.82 \text{ \AA}$) and 62 % ($\lambda \sim 8 \text{ \AA}$).

Keywords: detector, neutron, boron-10, two-dimentional, gaseous

REFERENCES

1. Tarnavich V.V., Volegov A.S., Lott D., Mattauch S., Vorobiev A., Oleshkevych A., Grigoriev S.V. [Structural and magnetic properties of the holmium-yttrium superlattice]. *Poverchnost' [Journal of Surface Investigation]*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 976–982. Doi: 10.1134/S1027451014050425.
2. Efremov R., Shiryayeva G., Bueldt G., Islamov A., Kuklin A., Yaguzhinsky L., Fragneto-Cusani G., Gordeliy V. SANS investigations of the lipidic cubic phase behaviour in course of bacteriorhodopsin crystallization. *J. of Cryst. Growth*, 2005, vol. 275, no. 1-2, pp. e1453–e1459. Doi: 10.1016/j.jcrysgro.2004.11.235.
3. Klein M., Schmidt C.J. CASCADE, neutron detectors for highest count rates in combination with ASIC/FPGA based readout electronics. *Nucl. Instr. Meth. A*, 2011, vol. 628, no. 1, pp. 9–18. Doi: 10.1016/j.nima.2010.06.278.
4. Bleuel M., Carpenter J.M., Micklich B.J., Geltenbort P., Mishima K., Shimizu H.M., Iwashita Y., Hirota K., Hino M., Kennedy S.J., Lal J. A small angle neutron scattering (SANS) experiment using very cold neutrons (VCN). *Physica B: Condensed Matter*, 2009, vol. 404, no. 17, pp. 2629–2632. Doi: 10.1016/j.physb.2009.06.048.

Contacts: *Karaevsky Sergey Kharitonovich*,
karaevsk@inr.ru

Article received in edition: 13.01.2017