

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



С.И. Поташев, А.И. Драчев, А.А. Афонин,
С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.Н. Марин, В.И. Разин,
Е.С. Конобеевский

Гибридный двухкоординатный детектор
медленных нейтронов
с чувствительными слоями из бора-10
размерами 400 мм × 400 мм

препринт
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1416/2015
ДЕКАБРЬ 2015

МОСКВА 2015 MOSCOW

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



С.И. Поташев, А.И. Драчев, А.А. Афонин,
С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.Н. Марин, В.И. Разин,
Е.С. Конобеевский

Гибридный двухкоординатный детектор
медленных нейтронов
с чувствительными слоями из бора-10
размерами 400 мм×400 мм

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1416/2015
ДЕКАБРЬ 2015
МОСКВА
2015

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences
60-th October Anniversary prospect 7a,
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
проспект 60-летия Октября, 7а
Москва, 117312

С.И. Поташев, А.И. Драчев, А.А. Афонин,
С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.Н. Марин,
В.И. Разин, Е.С. Конобеевский

Гибридный двухкоординатный детектор
медленных нейтронов
с чувствительными слоями из бора-10
размерами 400 мм×400 мм

Рассматривается двухкоординатный гибридный твердо-газовый многопроволочный детектор на основе множественных слоев бора-10 с чувствительной площадью 400×400 мм² для регистрации тепловых и холодных нейтронов. Эффективность регистрации одной секции детектора, состоящей из двух слоев ¹⁰B, оценивается ~10% при длине волны нейтрона 1,82Å и 18% при 8Å и может быть увеличена до 41% при 1,82Å и до 62% при 8Å за счет увеличения числа идентичных секций до 5. Оценка координатного разрешения с рабочим газом при нормальных условиях составляет 4 мм. Разрешение по времени пролета ~1 мкс. Для тиражирования числа секций создано оборудование для вакуумного литья деталей рам и их сборки, устройства для намотки проволоки и натяжения пленки или фольги на рамы. Разрабатываются электроника и две альтернативные системы сбора данных: на основе модулей КАМАК и VME TDC-2 и на основе сигнального процессора с аналого-цифровым преобразователем CAEN DT5720 и программное обеспечение к ним.

S.I. Potashev, A.I. Drachev, A.A. Afonin, S.Kh. Karaevsky,
Yu.M. Burmistrov, V.N. Marin, V.I. Razin,
E.S. Konobeevsky

Two dimensional hybrid solid state and gas
detector of active area 400×400 mm² based
on multi sensitive ¹⁰B layers for thermal and
cold neutrons

Two-dimensional hybrid solid state and gas multiwire detector of active area 400×400 mm² based on multi ¹⁰B layers for thermal and cold neutrons is proposed. Efficiency of single detector section of two ¹⁰B layers is estimated as ~10% at $\lambda = 1.82\text{\AA}$ and 18% at $\lambda = 8\text{\AA}$ and can be enhanced to 41% at $\lambda = 1.82\text{\AA}$ and 62% at $\lambda = 8\text{\AA}$ for five same section. Spatial resolution is estimated as 4 mm under standard conditions. Time of flight resolution is equal 1 μs . Equipment for frame detail vacuum casting and its assembling and wire, film and foil stretching on detector frame is in available for replicating of detector sections. Now electronic readout and two alternative acquisition systems based on both CAMAC and VME TDC-2 and digitizer CAEN DT5720 and so as software is elaborating.

С.И. Поташев, А.И. Драчев, А.А. Афонин,
С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.Н. Марин,
В.И. Разин, Е.С. Конобеевский

Гибридный двухкоординатный детектор медленных
нейтронов с чувствительными слоями из бора-10
размерами 400 мм×400 мм

Препринт 1416/2015

Декабрь 2015

Подписано в печать 19.10.2015

Ф-т 60х84/8. Уч.-изд.л. 1,9. Зак. 22375 Тираж 70 экз.
Бесплатно

Печать цифровая
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

ISBN 978-5-94274-304-8

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук, 2015
Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences, 2015

1. Введение

Гибридный твердо-газовый двухкоординатный многопроволочный детектор медленных нейтронов на основе слоев бора-10 будет использоваться в качестве монитора нейтронного потока, в дифрактометре и на установке малоуглового рассеяния на Линейном ускорителе протонов в Институте ядерных исследований РАН. Дифрактометры применяются во многих задачах исследования наноструктур в физике конденсированных сред при длине волны нейтронов от 0,9 до 6 Å. Одной из таких задач является изучение фазовых переходов в высокотемпературных сверхпроводниках [1]. Изучение структурных и магнитных свойств сверхрешетки есть также предмет исследования на этих установках [2]. Эксперименты по определению структуры тонких кристаллических пленок выполняются на таких установках [3]. В области длин волн нейтронов 8 Å исследуется структура биомолекул, например, молекулы протеина [4, 5]. Этот детектор, в отличие от наполненных газом при высоком давлении, можно применять в экспериментах с холодными нейтронами [6].

Проблема дороговизны и недоступности изотопа гелий-3, в также потеря стабильности детектора из-за утечки и загрязнения газа при многолетней эксплуатации приводит к поиску альтернативы при создании детекторов нейтронов. Применение твердо-газового конвертера нейтронов на основе бора-10 решает не только эту проблему, но и позволяет работать при атмосферном давлении с дешевыми газами [7]. Локализация точки взаимодействия нейтрона в плоскости слоя бора-10 позволяет достичь высокого координатного и временного разрешения. Наилучшее разрешение достигается при регистрации в совпадении обеих заряженных частиц, вылетающих из ядерной реакции [8].

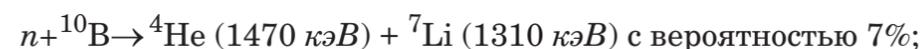
Размеры чувствительной области большинства существующих детекторов такого типа не превышает 100×100 мм², а разрешение определяется длиной среднеквадратичной проекции трека альфа-частицы от точки взаимодействия нейтрона с ядром бора до места сбора заряда и составляет от 1 до 5 мм [9]. Для детекторов большого размера пред-

почтительным является использование сеток газового усиления (GEM-сетки). Однако, их дороговизна (одна дырка стоит 1 евро) до сих пор ограничивает их применение.

Преимуществом гибридного детектора на основе бора-10 перед газовым детектором является малая толщина входного окна, которое незначительно ослабляет и рассеивает поток нейтронов, долговечность при хранении и использовании, а недостатком является ограниченная эффективность одного конвертирующего слоя [10].

2. Захват нейтронов в слое бора-10, пространственное разрешение и эффективность

Детектирование нейтронов в детекторе основано на регистрации заряженных частиц, вылетающих из двух ядерных реакций



суммарное поперечное сечение которых при энергиях до 1 кэВ вычисляется по формуле

$$\sigma = \sigma_0 \sqrt{\frac{E_0}{E}} = 4,01 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2 \sqrt{\frac{0,025 \text{ эВ}}{E}} = \sigma_0 \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_0}} = 4,01 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2 \sqrt{\frac{\lambda}{1,82 \text{ \AA}}}$$

Рассматривается детектор, состоящий из двух и более слоев бора-10, нанесенных на алюминиевые пластины и покрытых тонким слоем алюминия в качестве катодов, между которыми расположена проволочная пропорциональная камера для регистрации вторичных заряженных частиц. Эффективность такого детектора для данной длины волны нейтрона растет с увеличением толщины слоя ${}^{10}\text{B}$ и уменьшается за счет поглощения вторичных заряженных частиц в этом же слое и в слоях других материалов, расположенных перед газовым зазором детектора. Несмотря на то, что бор является полупроводником, его структура и низкая стабильность поверхности не позволяет использовать его в качестве электрода, как это предложено в работе [11]. Поэтому на поверхности бора последовательно формируется: нанометровый изолирующий слой, тонкий слой алюминия и нанометровый слой полупроводящего полимера, предохраняющий алюминий от окисления, как это было сделано в нашем детекторе размерами $128 \times 128 \text{ мм}^2$ [9]. Далее будет показано,

что оптимальная толщина слоя алюминия равна 0,1–0,2 мкм, в котором поглощение вторичных заряженных частиц несущественно. В следующей таблице 1 приведены доля провозимодействовавших нейтронов и ожидаемая эффективность регистрации ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$, если за слоем бора в качестве электрода нанесен слой алюминия толщиной 0,2 мкм.

Таблица 1

$\lambda, \text{ \AA}$	1,82	4	8	16	1,82	4	8	16
толщина слоя	доля поглощенных нейтронов, %				Эффективность, %			
1,0	10,5	15,3	21,3	29,5	7,4	10,7	14,6	20,1
1,5	15,5	22,6	31,1	42,6	9,0	12,7	17,4	23,8
2,0	20,4	29,5	40,4	54,7	9,8	14,0	19,1	25,3
2,5	25,2	36,2	49,2	65,8	10,3	14,7	19,6	25,6
3,0	29,8	42,6	57,5	76,1	10,4	14,7	19,3	24,8
3,5	34,3	48,7	65,3	85,6	10,2	14,2	18,4	23,1
5,0	47,2	65,8	86,3	100	9,5	12,6	15,5	18,3
10,0	83,3	100	100	100	7,2	8,4	8,9	8,2

Из таблицы 1 следует, что оптимальная толщина слоя кристаллического бора-10 составляет 2,5 мкм, а на рис.1а представлен ожидаемый спектр заряженных частиц, вылетающих из такого слоя кристаллического ${}^{10}\text{B}$ с плотностью $2,35 \text{ г/см}^3$. В нем можно наблюдать два пика, соответствующих энергиям 1470 кэВ ${}^4\text{He}$ и 830 кэВ ${}^7\text{Li}$ на континууме, соответствующем этим частицам, тормозящимся в оставшейся толщине бора. Вклад второй реакции без испускания фотона является несущественным. Эффективность двухслойного детектора без покрытия алюминием составит 11,6% при $\lambda = 1,82 \text{ \AA}$.

На рис. 1б представлен спектр заряженных частиц, вылетающих после прохождения 2,5 мкм слоя бора и алюминия с толщиной 0,01 мкм, соответствующий эффективностям 10,9% для альфа частиц и ядер лития. На рис. 1в, 1г изображены спектры после прохождения электрода с алюминием толщиной 0,1 мкм и 0,2 мкм и соответствующими эффективностями 10,9% и 10,3% соответственно, которые также существенно не ослабляют заряженные частицы. На рис. 1д, 1е изображены спектры вылетающих заряженных частиц из электрода со слоем алюминия толщиной 0,5 мкм и 1 мкм и эффективностью 8,5% и 5,9% соответственно, которые существенно ослабляют заряженные частицы, особенно ядра лития. Выбираем толщину алюминиевого слоя 0,2 мкм в качестве оптимальной.

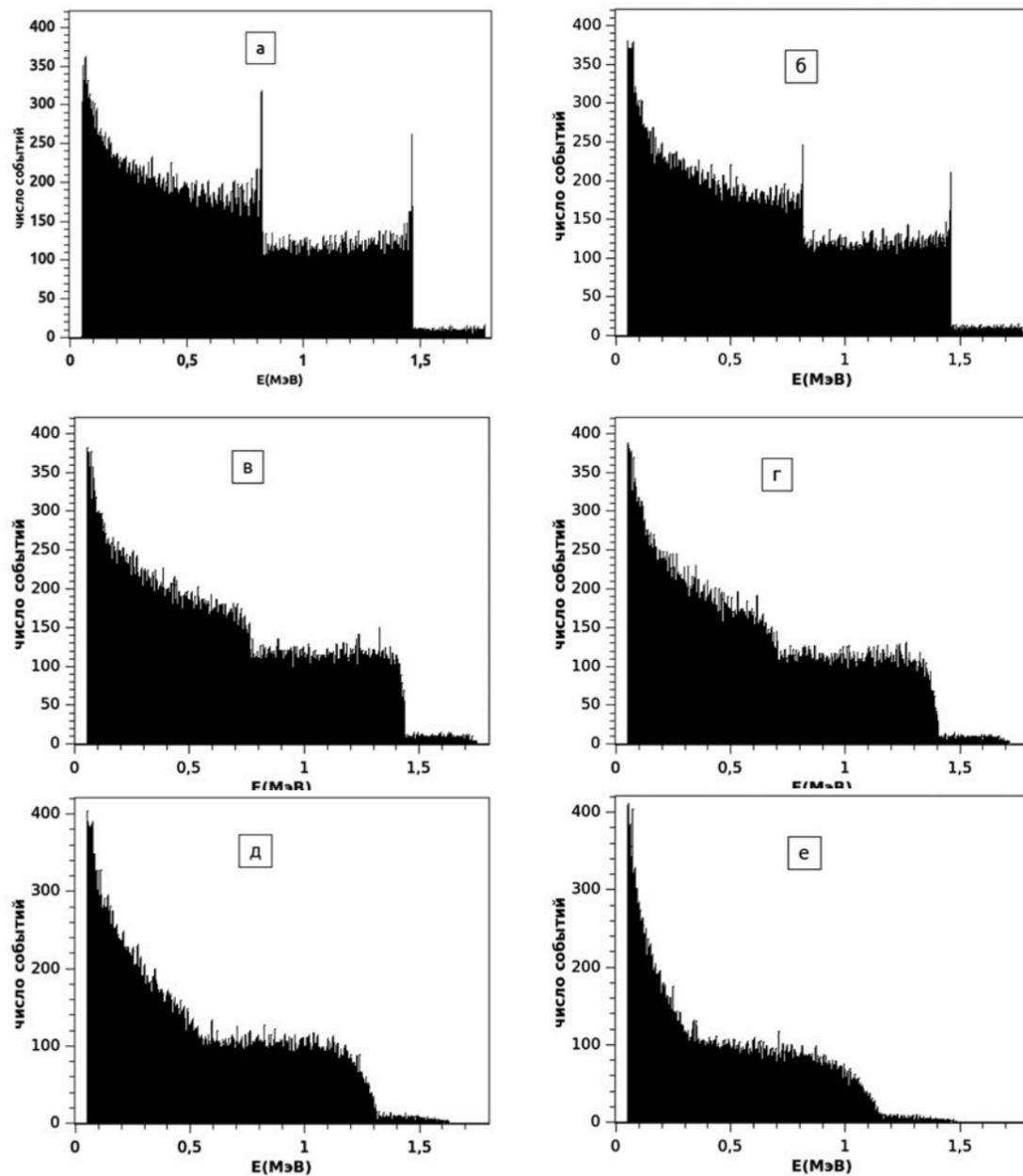


Рис. 1. Ожидаемый спектр заряженных частиц с энергиями 1470 кэВ ^4He и 830 кэВ ^7Li , вылетающих из слоя бора толщиной 2,5 мкм с различной толщиной алюминиевого слоя на его поверхности:

а) 0 мкм; б) 0,01 мкм; в) 0,1 мкм; г) 0,2 мкм; д) 0,5 мкм; е) 1 мкм

Из двухслойных модулей с оптимальной толщиной слоев ^{10}B собирается многослойный детектор. 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 учи-

тывать ослабление потока нейтронов в 2мм алюминиевой пластине. Полная эффективность детектора определяется суммарным слоем ^{10}B . В таблице 2 приводим расчетную эффективность для различных длин волн нейтронов.

Таблица 2

$\lambda, \text{ \AA}$	1,82	4	8	16
число слоев	Эффективность, %			
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

Эффективность детектирования нейтрона зависит только от толщины слоев бора-10, доли вылетевших альфа-частиц и ядер лития-7 и эффективности регистрации их пропорциональной камерой.

В состав газовой смеси входит Ar, CO_2 и фреон CF_4 , который уменьшает пробег вылетающих частиц для улучшения позиционного разрешения и вместе с CO_2 препятствует 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 3,8 мм. Распределение координаты представлено на рис. 2. 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. Суммарное позиционное разрешение составляет 3,9 мм.

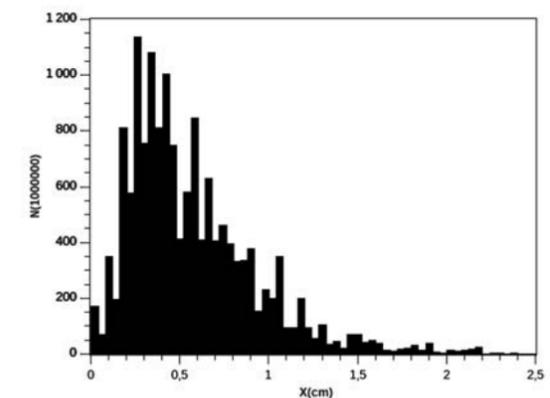


Рис. 2. Распределение по координате центра тяжести лавины для падающих нейтронов с длиной волны 1,82 \AA

Сравнение основных характеристик нашего детектора с характеристиками аналогов

Разрабатываемый детектор будет превосходить большинство существующих и проектируемых детекторов по размерам активной площади $400 \times 400 \text{ мм}^2$ и возможности быстрого увеличения количества чувствительных слоев за счет унификации деталей для увеличения эффективности. Детали изготавливаются методом точного вакуумного литья из кварцевого песка и компаунда K115. Прототипом этого детектора служит созданный нами однослойный детектор с активной площадью $128 \times 128 \text{ мм}^2$ [9]. Недавно было заявлено о создании детектора в виде счетчика диаметром 30 мм и длиной 1500 мм^2 из одного слоя $^{10}\text{B}_4\text{C}$ [10] и предложен новый детектор с многослойной структурой и использованием сеток газового электронного умножения (gas electron multiplier (GEM)) [11] с активной площадью $200 \times 200 \text{ мм}^2$. Следует заметить, что сетка газового электронного умножения до сих пор остается сложным и дорогим элементом с технологической точки зрения, стоимость которых может значительно превышать стоимость газа гелий-3. В следующей таблице 3 для детекторов приведены: рабочее вещество и толщина одного слоя, чувствительного к нейтронам, значения эффективности регистрации нейтронов. В скобках указано число чувствительных слоев изотопа бор-10.

Таблица 3

$\lambda, \text{Å}$	3 мкм ^{10}B , $128 \times 128 \text{ мм}^2$ [9]	1,5 мкм ^{10}B , $200 \times 200 \text{ мм}^2$ [12]	Наш, 2,5 мкм ^{10}B , $400 \times 400 \text{ мм}^2$
1,82	3,0%(1)	8%(3), 16%(8), 50%(20)	10,3%(2), 41,0%(10)
4	4,3%(1)	16%(3), 32%(8), 70%(20)	14,7%(2), 52,2%(10)
8	5,8%(1)	32%(3), 55%(8), 80%(20)	19,6%(2), 62,2%(10)
16	7,5%(1)	50%(3), 66%(8), 82%(20)	25,6%(2), 69,4%(10)

Отметим, что в работе [10] было показано, что оптимальная толщина слоя бора-10 составляет 2,5–3 мкм, что соответствует результатам настоящей работы, а не 1,2–1,4 мкм как это заявлено в работе [11]. Данный метод детектирования медленных нейтронов нашел свое продолжение при создании монитора пучка нейтронов в CERN [12] и в детекторе ультрахолодных нейтронов [13]. Если применить вместо алюминиевых пластин рамы с тонкой алюминиевой фольгой в качестве основы для катодов с конвертирующим ^{10}B слоем, то можно получить ту же эффектив-

ность регистрации с 10 слоями, как и в детекторе [11] с применением 20-и слоев. Однако, это значительно усложнит технологию создания катодов большой площади.

Технические характеристики разрабатываемого детектора

№	Параметр	Величина	Комментарий
1	Активная площадь	$400 \times 400 \text{ мм}^2$	Внутренний размер рам — электродов, чувств. область $384 \times 384 \text{ мм}^2$
2	Толщина элемента	^{10}B , 2,5 мкм	Два слоя имеют 5 мкм ^{10}B
3	Рабочий газ	0,5 бар CF_4 0,4 бар Ar 0,1 бар CO_2	Общее давление 1 бар
4	Пространственное разрешение	3,9 мм	За счет пространственной неопределенности 3,8 мм, за счет метода считывания 0,7 мм
5	Эффективность регистрации нейтронов детектором из 2 слоев	10,3%, $\lambda = 1,82 \text{ Å}$ 14,7% $\lambda = 4 \text{ Å}$ 19,6% $\lambda = 8 \text{ Å}$ 25,6%, $\lambda = 16 \text{ Å}$	электронная лавина регистрируется от каждой заряженной частицы с порогом регистрации 50 кэВ
6	Эффективность регистрации нейтронов детектором из 10 слоев	41,0%, $\lambda = 1,82 \text{ Å}$ 52,2% $\lambda = 4 \text{ Å}$ 62,2% $\lambda = 8 \text{ Å}$ 69,4%, $\lambda = 16 \text{ Å}$	электронная лавина регистрируется от каждой заряженной частицы с порогом регистрации 50 кэВ
7	Эффективность к γ	< 0,001%	Оценка по другим детекторам
8	Катодная проволока	50 мкм	Бериллиевая бронза
9	Анодная проволока	20 мкм	Вольфрам — рений, покрытая золотом
10	Дрейфовый электрод	500; 2,5; 0,1 мкм	Al, ^{10}B , Al
11	Линия задержки	$191 \times 1,25 \text{ нс} = 239 \text{ нс}$	Из дискретных элементов L и C
12	U0	около – 4200 В	катод-анод
13	U1	около – 4200 В	анод-дрейфовый электрод
14	Расстояние между электродами	6,67 мм	катод-анод, анод-дрейфовый электрод
15	Габариты	$650 \times 650 \times 80(190) \text{ мм}^3$	Для 2 слоев, в скобках указано для 10 слоев
16	Вес	45 (110 кг)	Для 2 слоев, в скобках указано для 10 слоев

Многопроволочная пропорциональная камера

Конструкция двухслойной (с одним модулем) многопроволочной пропорциональной камеры представлена на рис.3. Корпус детектора состоит из двух рам из дюралюминия марки Д16Т толщиной 20 мм с окном из алюминий-магниевого сплава АМГ6 толщиной 0,5 мм и площадью 400×400

мм² для пропускания нейтронов. Между рамами последовательно расположены:

- изолирующая полиимидная пленка;
- алюминиевый дрейфовый электрод с 2,5 мкм слоем ¹⁰B, покрытый алюминием толщиной менее 0,2 мкм;
- изолирующая рама;
- рама с проволокой ВР20 толщиной 20 мкм с шагом намотки 2 мм, анод, координата X;
- рама с проволокой БрБ толщиной 50 мкм с шагом намотки 1 мм, катод;
- рама с проволокой ВР20 толщиной 20 мкм с шагом намотки 2 мм, анод, координата Y;
- алюминиевый дрейфовый электрод с 2,5 мкм слоем ¹⁰B, покрытый алюминием толщиной менее 0,2 мкм;
- изолирующая полиимидная пленка.

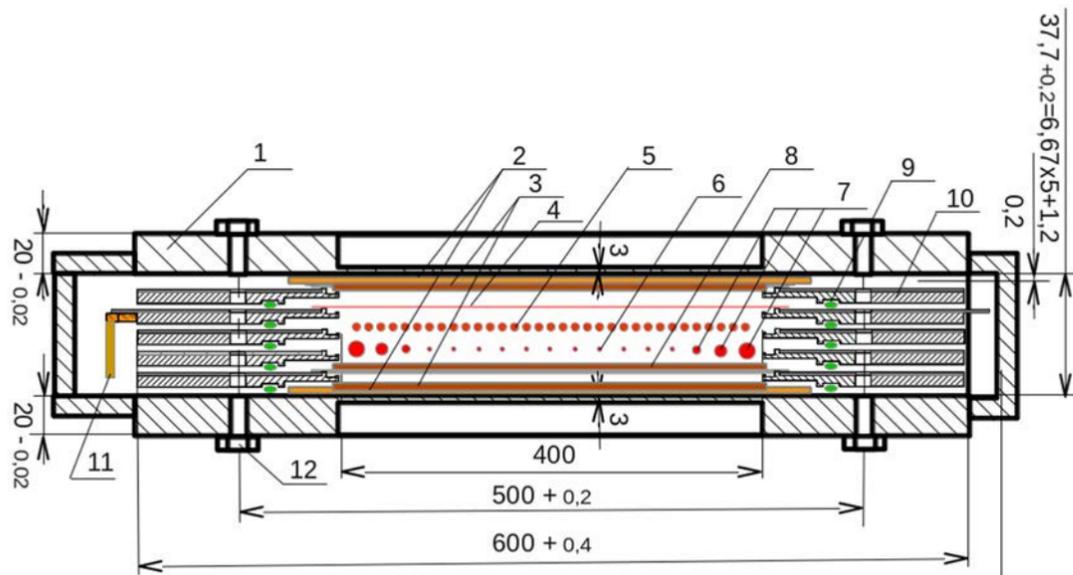


Рис. 3. Устройство пропорциональной камеры. Элементы внутри окна камеры показаны уменьшенными по горизонтали.

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

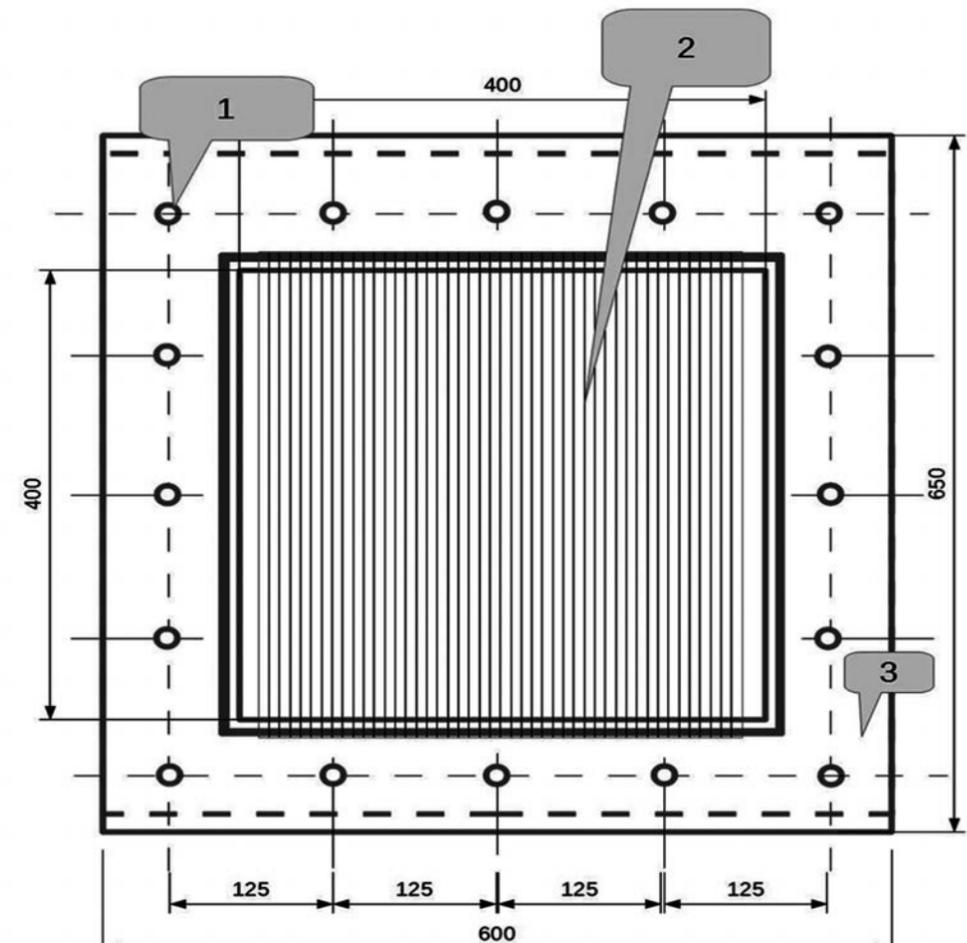


Рис. 4. Рама. 1 — Отверстие для шпильки. 2 — Проволоки (шаг 1 или 2 мм.). 3 — Рама

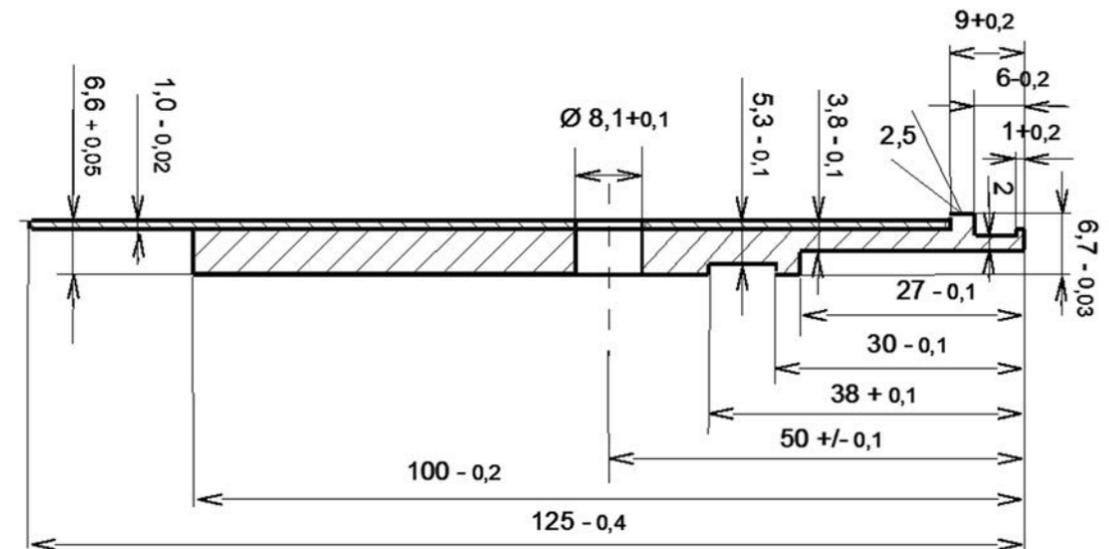


Рис. 5: Сечение стороны рамы.

1 — Отверстие под шпильки. 2 — Спейсер для проволоки. 3 — Печатный электрод

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

Рама-электроды имеют натянутые параллельно друг другу проволочки. Аноды состоят из 192 изолированных друг от друга проволочек диаметром 20 мкм из покрытого золотом вольфрам-рениевого сплава и охранных проволок толщиной 50, 80 и 200 мкм, которые намотаны с шагом 2 мм. Центральный катод, расположенный в середине сборки камеры, состоит из электрически объединенных вместе 384 проволочек с шагом 1 мм диаметром 50 мкм из покрытой золотом бериллиевой бронзы. Проволочки анодов взаимно перпендикулярны друг другу. Слои бора-10 направлены внутрь сборки электродов. Такая структура может быть повторена несколько раз для увеличения суммарной эффективности детектора.

Проволочки каждой рамы соединены между собой через дискретные задержки величиной 1,25 нс, состоящие из одинаковых индуктивностей и емкостей. Таким образом, общая задержка сигнала каждого катода составляет 239 нс. Выводы с двух концов линии задержки для каждого анода подключаются к соответствующему усилителю, вывод с катода, вывод с дрейфовых электродов подключаются к высоковольтному источнику и через разделительный конденсатор к усилителю-дискриминатору запускающего импульса триггера. Потенциал анода составляет от 3800 до 4200 В и будет зависеть от состава газовой смеси.

Влияние газовой смеси на эффективность и разрешение

Эффективность регистрации нейтронов зависит только от толщины слоя ^{10}B . Эффективность незначительно падает за счет толщины и материала входного окна и других элементов, находящихся перед активными слоями ионизационной 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, также как и зазор между катодом и дрейфовым электродом, составляет 6,67 мм, толщина газа детектора $6,67 \text{ мм} \times 4 = 26,68 \text{ мм}$. Объем газа внутри рам равен $4 \text{ дм} \times 4 \text{ дм} \times 0,2668 \text{ дм} = 4,27 \text{ л}$.

Линии задержки

Проволочки каждой рамы (см. Рис.4 и сечение стороны рамы в крупном масштабе см. Рис.5) соединены между собой через дискретные задержки величиной 1,25 нс, состоящие из одинаковых индуктивностей и емкостей. Таким образом, общая задержка сигнала каждого катода составляет 289 нс. Линии задержки, состоящие из проволочных индуктивностей серии CM4532(1ROKLB) с индуктивностью $1,25 \text{ мкГн} \pm 10\%$ в количестве 191 штуки и кремниевые конденсаторы серии MMX-E с емкостью: $10 \text{ пФ} \pm 10\%$ в количестве 191 штуки, непосредственно распаяны на анодах детектора. При использовании модуля VME TDC-2 дискретная задержка должна быть увеличена до 10 нс, а общая задержка до 2312 нс.

Регистрирующая электроника

Усилитель формирователь

Модуль содержит малошумящий усилитель и формирователь со следящим порогом.

Параметры усилителя:

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

Параметры формирователя:

- Диапазон нижнего порога $0 \div 0.5 \text{ В}$;
- Диапазон верхнего порога $0 \div 2 \text{ В}$;
- Временное разрешение выходного импульса 170 пс;

На Рис.6 приведена структурная схема усилителя-формирователя. Входной сигнал с конца линии задержки через высоковольтный конденсатор и $R1$ поступает на вход малошумящего усилителя $A1$. Резистор $R1$ и диоды $D1, D2$ образуют защиту усилителя. После усиления на усилителе $A1$ через цепочку $C1, R3$ поступает на вход масштабирующего усилителя $A2$. С выхода этого усилителя сигнал поступает на компаратор $Com2$ и на каскад на операционном усилителе $A3$. На усилителе $A3$ реализован детектор выделения нуля. На положительный вход сигнал с выхода $A3$ подается через задержку, а на инвертирующий без задержки. Задержка ($R6, C2$) обеспечивает привязку к вершине импульса. Далее продифференцированный импульс подается на компаратор $Com1$. Подстройкой уровня напряжения (порог) достигается наимень-

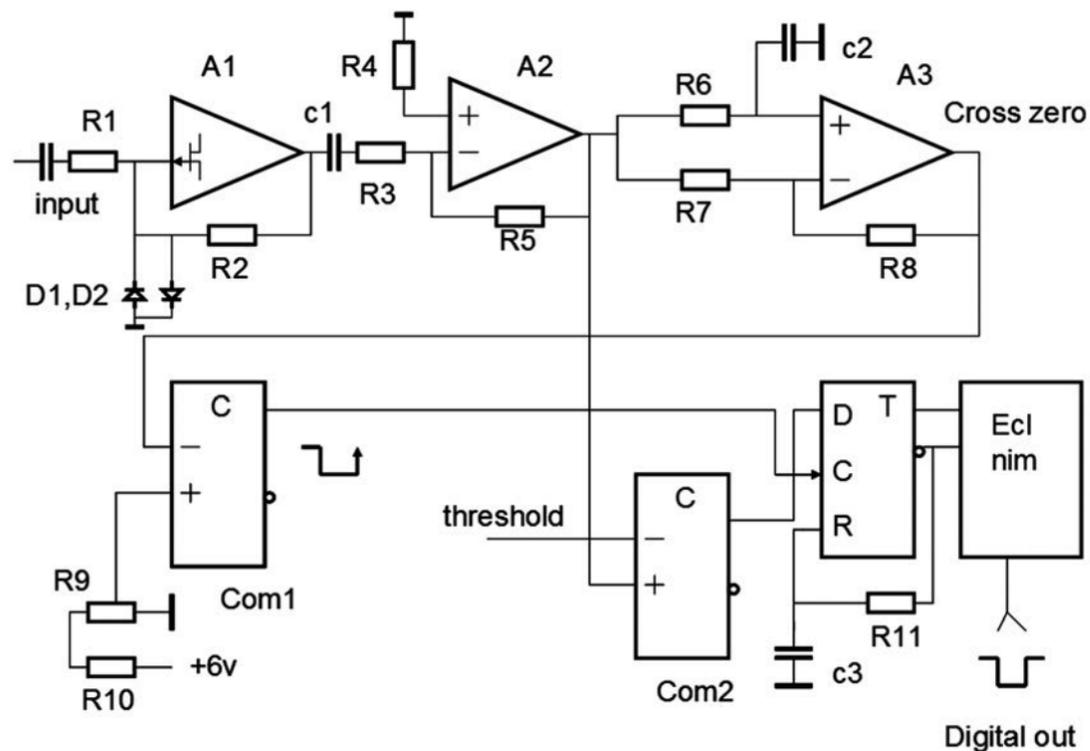


Рис.6. Структурная схема усилителя – формирователя.

шее разброс выходного импульса по величине задержки для различных амплитуд входного сигнала от детектора. Импульсный сигнал с выхода компаратора приходит на тактовый вход формирователя выходного импульса, организованного на *D* триггере (*T*). Длительность выходного импульса определяется цепью *C3*, *R11*. С выхода этого формирователя импульсный сигнал через преобразователь ECL – NIM поступает на выход модуля. Если сигнал с выхода усилителя *A2* превышает порог, заданный на компараторе *Com2* на информационном входе *D* триггера *T* возникает логическая единица, разрешающая работу выходного формирователя. Задним фронтом импульса компаратора *Com1* выходной формирователь запускается и вырабатывает выходной импульс. Задний фронт отрицательного импульса имеет задержку, которая не зависит от амплитуды входного импульса.

Система сбора данных КАМАК и VME

Структурная схема системы сбора данных КАМАК изображена на Рис.7. Синхроимпульс ускорителя запускает аналого-цифровой преобразователь АЦП, который запоминает форму каждого импульса, посту-

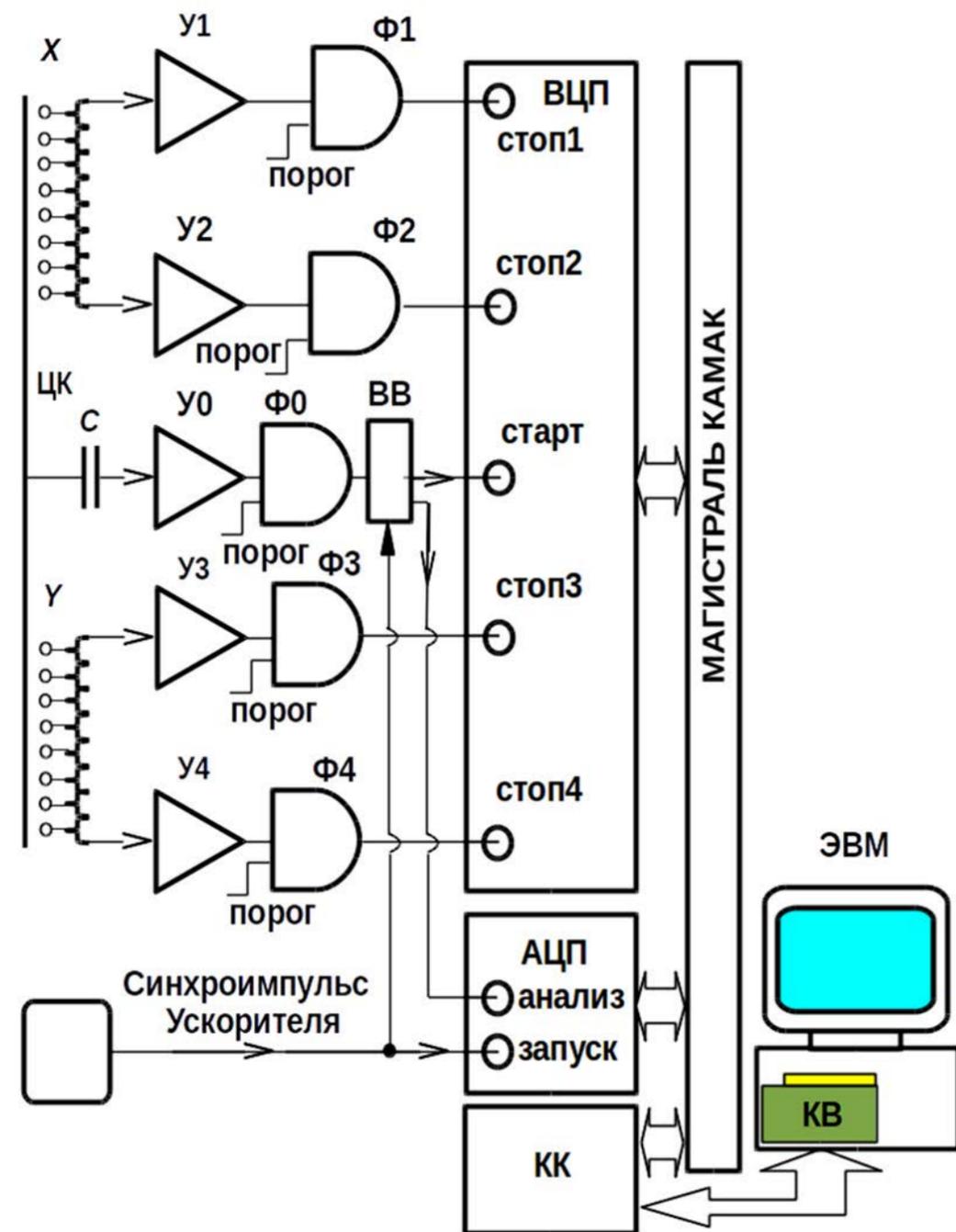


Рис. 7. Структурная схема системы сбора данных с модулями КАМАК.
КК — крейт контроллер, КВ — плата PCI контроллера ветви

пающего с центрального катода пропорциональной камеры и констатирующего факт детектирования очередного нейтрона, и одновременно открывает временные ворота ВВ для прохождения этого импульса с первого выхода на вход «старт» время-цифрового преобразователя ВЦП

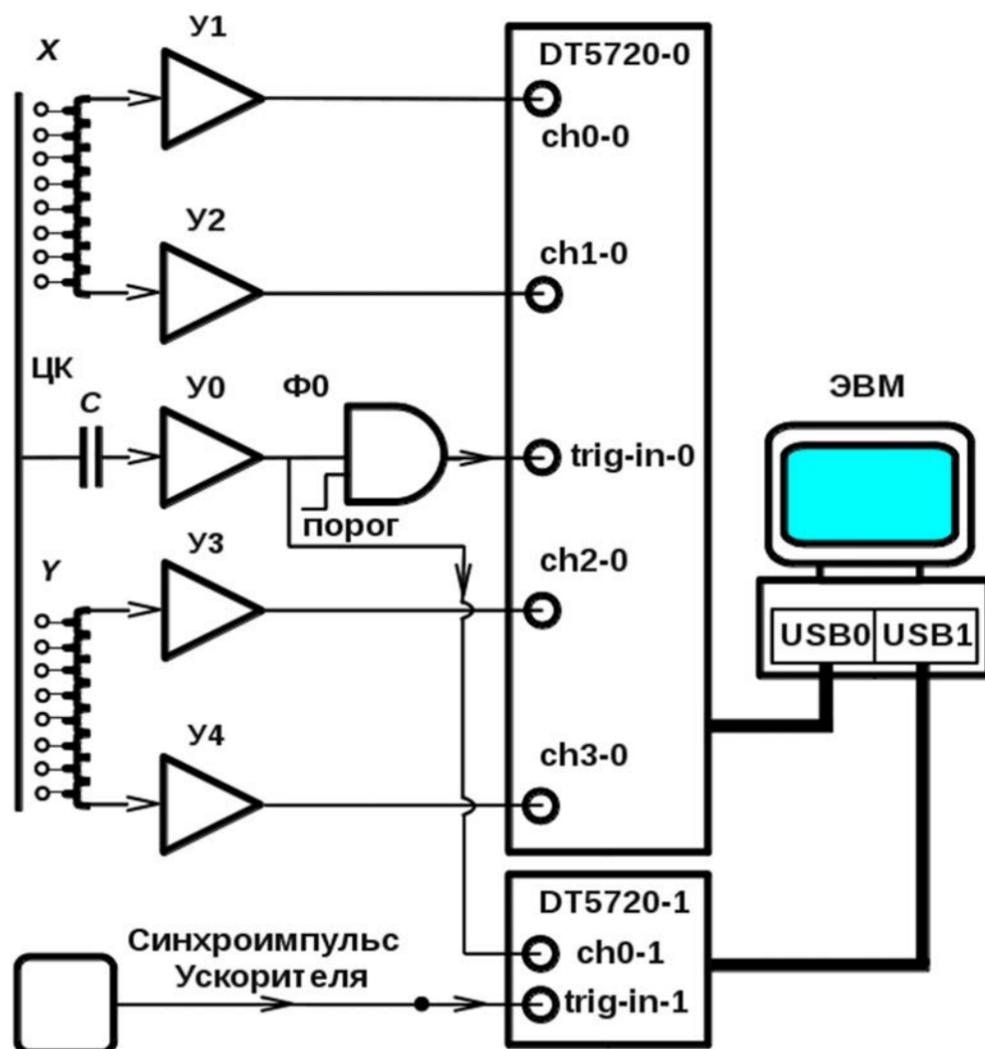


Рис. 8. Структурная схема системы сбора данных с модулями CAEN DT5720

для измерения координат этого нейтрона X и Y . Со второго выхода **ВВ** сигнал поступает на вход «анализ» **АЦП**.

Вследствие того, что диапазон времен пролета нейтронов с длиной волны от 1А до 8А на дистанции 12 м превышает 1 мс и за этот период детектор может зарегистрировать несколько нейтронов, то для измерения времени пролета нейтронов предлагается применить **АЦП** с запоминанием формы импульса. Подходящий для этой цели модуль — ФК4225 сопряженный с модулем памяти МОЗУ-64К. Форма получаемых сигналов записывается в память шириной 64К выборок с периодом цикла преобразования 0,05 мкс, то есть в памяти записываются логические импульсы, связанные с нейтронами во временном окне шириной 3200 мкс. Запуск **АЦП** осуществляется подачей синхро-

импульса ускорителя на вход «запуск» и на вход «анализ» подается превысивший порог сигнал с выхода формирователя **Ф0**, на вход которого поступает усиленный услителем **У0** и отфильтрованный высоковольтным разделительным конденсатором **С** сигнал с центрального катода пропорциональной камеры, соответствующий моменту детектирования нейтрона.

Сигнал с первого выхода временных ворот **ВВ** запускает **ВЦП** (С414-CAEN, TDC2228A-LeCroy или ВЦП8-ИЯИ) для измерения координат X и Y нейтрона. Эти координаты записываются в ЭВМ, **ВЦП** приводится в исходное состояние и ожидает приема импульса от следующего нейтрона. **ВЦП** имеет общий вход «старт» и 4 входа: «стоп1», «стоп2», «стоп3», «стоп4» с диапазоном измерения времени 300 нс и шагом измерения времени 0,3 нс. На вход «старт» поступает сигнал с центрального катода пропорциональной камеры через высоковольтный разделительный конденсатор **С**, усиленный услителем **У0** и сформированный формирователем **Ф0**. Этот сигнал соответствует моменту регистрации нейтрона. С двух концов линии задержки координаты X сигналы через усилители **У1** и **У2** и соответствующие им формирователи с временной привязкой **Ф1** и **Ф2** поступают на входы «стоп1» и «стоп2» время-цифрового преобразователя **ВЦП**. Из соотношения разностей времени между временными отметками «стоп1» и «старт» и между временными отметками «стоп2» и «старт» определяется координата X . Аналогично, с распределенной линии задержки координаты Y сигналы через усилители **У3** и **У4** и соответствующие им формирователи с временной привязкой **Ф3** и **Ф4** поступают на входы «стоп3» и «стоп4» время-цифрового преобразователя **ВЦП**. Из соотношения разностей времени между временными отметками «стоп3» и «старт» и между временными отметками «стоп4» и «старт» определяется координата Y .

Из модулей **ВЦП** и **АЦП** через контроллер КАМАК и **PCI**-плату контроллера ветви данные, накопленные за интервал измерения нейтронов между макроимпульсами ускорителя, записываются на диск компьютера.

В Институте ядерных исследований разрабатывается 16-ти канальный модуль время-цифрового преобразователя с памятью **TDC-2**, который может использоваться в качестве 16-ти канального время-цифрового преобразователя с памятью последовательных событий данных из 16 каналов. Каждый канал будет имеет индивидуальную на-

стройку ширины временного канала в широких пределах от 10 нс до 16 мкс. Регистрация событий происходит в течение программируемого периода временных ворот.

Системы сбора данных с использованием модулей DT5720

Структурная схема альтернативной системы сбора данных на основе двух аналого-цифровых сигнальных процессоров DT5720 фирмы CAEN изображена на Рис.7. Первый модуль, DT5720-0 работает с минимальным квантом времени 4 нс и использует все 4 канала регистрации, второй — DT5720-1 использует квант времени 1 мкс и один канал регистрации. Синхроимпульс ускорителя подается на вход «**trig-in-1**» и в течении заданного времени в канале «**ch0-1**» модуля DT5720-1 регистрирует форму каждого импульса, поступающего с выхода усилителя У0, на вход которого поступает сигнал с центрального катода пропорциональной камеры. Импульс с У0, сформированный формирователем Ф0, который свидетельствует о детектировании очередного нейтрона, подается на вход «**trig-in-0**» модуля DT5720-0 и запускает кодирование формы сигналов, поступающих с двух концов линии задержки для координаты X на входы «**ch0-0**» и «**ch1-0**» и поступающих с двух концов линии задержки для координаты Y на входы «**ch2-0**» и «**ch3-0**» для определения координат этого нейтрона.

Кодирование, анализ и запись данных о координатах нейтрона из DT5720-0 в память компьютера осуществляется в течение 300 нс после чего этот модуль приводится в исходное состояние ожидания поступления нового сигнала на вход «**trig-in-0**».

Кодирование, анализ и запись данных о времени пролета нейтрона из DT5720-1 в память компьютера осуществляется в течение периода 1000 мкс после чего этот модуль приводится в исходное состояние ожидания поступления нового сигнала синхроимпульса ускорителя на вход «**trig-in-1**».

Из осциллограмм определяются точное положение вершин импульсов, а по ним временные отметки для определения координат X и Y и времени пролета нейтрона. При этом точность определения вершин импульсов оказывается значительно лучше величины кванта времени, установленного в сигнальном процессоре. За период между синхроимпульсами ускорителя можно зарегистрировать данные о нескольких нейтронах.

Программное обеспечение для системы сбора данных-КАМАК и VME

Программное обеспечение для систем сбора данных на основе компьютера-контроллера ККА2-РС или комплекта из 32-х разрядного контроллера КАМАК и платы контроллера ветви и модуля TDC-2, разработанных в ИЯИ РАН состоит из:

- специальной программы-драйвера КАМАК на уровне ядра, которая обеспечивает максимально возможное быстродействие модулей;
- программы-драйвера CAENUSBdrv;
- библиотеки КАМАК, которая взаимодействует, в свою очередь, с драйвером КАМАК;
- библиотеки CAENVME, которая взаимодействует с драйвером CAENUSBdrv.

Программы vmemarine для работы с модулями VME TDC-2 и модулями КАМАК.

Для обеспечения высокой надежности и быстродействия программного обеспечения (ПО) разрабатывалось на платформе ОС *Linux openSUSE* версий 11.0, 11.3, 11.4, 12.2, 12.3. В дальнейшем ПО было адаптировано также для ОС *Linux Ubuntu* версии 10.04, 11.10, 12.04. В процессе разработки использовалась кроссплатформенная библиотека классов Qt4. ПО написано на объектно-ориентированном языке *g++* (версия языка *C++* для *Linux*). Данное ПО позволяет пользователям быстро изменять состав установки для решения конкретных задач, используя широкий набор модулей фирм CAEN, ORTEC, LECROY, PHILIPS, POLON, VEMTG и модулей, разработанных в конструкторском отделе радиоэлектроники института ядерных исследований РАН.

Для измерения времени для определения координат можно использовать 16-канальный дискриминатор со следящим порогом С808 с программируемыми порогами и ВЦП с одним стартом и 8-ю стопами С414 фирмы CAEN. Можно также использовать модули TDC2228A фирмы LeCroy или ВЦП8, разработанные в ИЯИ РАН. Для измерения времени пролета предлагается использовать аналого-цифровой преобразователь ФК4225 с МЗУ объемом 64К. Программная панель с измеренной информацией представлена на Рис.9.

Разрабатываемый модуль TDC-2 может позволить измерять как время пролета так и координаты нейтрона, При этом, возможно зарегистрировать несколько нейтронов за период сброса ускорителя.

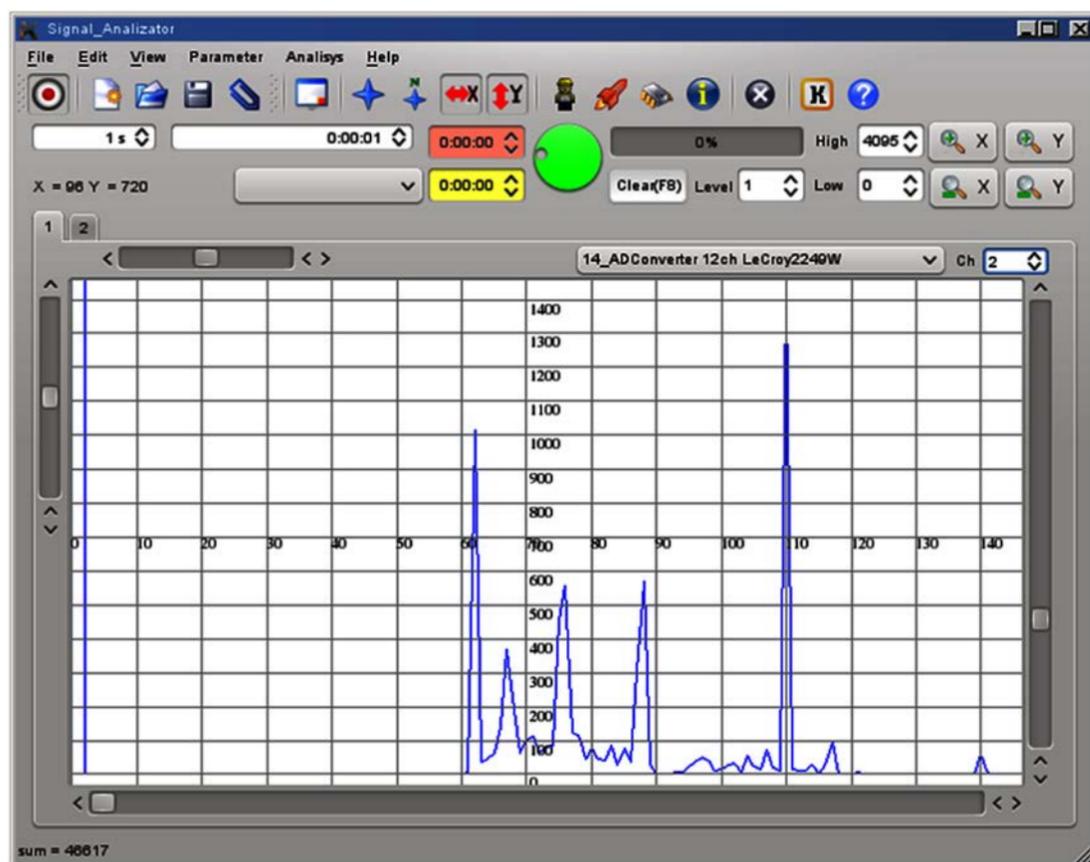


Рис.9. Программная панель с измеренной информацией

Программное обеспечение для системы сбора данных с DT5720

Программное обеспечение для второго варианта информационной системы использует два модуля аналого—цифрового преобразователя CAEN DT5720. Первый модуль DT5720-1 использует один канал, настроенный на частоту 1МГц и ниже для измерения времени пролета. Триггерным сигналом для него служит сигнал синхроимпульса ускорителя, а сигналы от высоковольтного центрального катода, прошедшие через разделительный конденсатор, превысившие порог и определяющие факт детектирования нейтрона, регистрируются в его нулевом канале до заполнения программно заданной части буфера. Разность момента времени фронта сигнала от нейтрона и момента фронта синхроимпульса ускорителя определяет время его пролета.

Второй 4-х канальный аналого-цифровой преобразователь DT5720-0 программно начинает регистрацию при поступлении усиленного и

сформированного сигнала от центрального катода пропорциональной камеры. Он записывает осциллограмму сигналов с частотой 250 МГц со всех 4-х каналов для измерения двух координат и работает по сигналу триггера о факте регистрации нейтрона. После регистрации сигналов во всех четырех каналах или по истечению времени 300 нс содержимое буферов считывается и записывается на диск и модуль DT5720-0 программно устанавливается в исходное состояние ожидания нового триггера. Два канала регистрируют сигналы, поступившие на два конца линии задержки координаты X, два других регистрируют сигналы, поступившие на два конца линии задержки координаты Y. Алгоритм обработки данных заключается в следующем: после сглаживания формы сигнала определяем положение его вершины и вычисляем время прихода их на концы линии задержки относительно триггера нейтрона. Из соотношения этих пар времен вычисляем координаты нейтрона. По истечению времени заполнения заданной части буфера первого модуля DT5720-1 оба модуля приводятся в исходное состояния с ожиданием следующего сигнала синхроимпульса ускорителя.

Имеющееся оборудование для производства камер

На фотографии Рис.10 показана пресс-форма для вакуумного литья одной стороны рамы из эпоксидного компаунда и кварцевого песка. На Рис.11 представлено изображение четырех отливок сторон рамы на столе для склеивания. На Рис.12 изображены склеенная рама на столе для склеивания проволочных и пленочных рам пропорциональных камер. На Рис.13 представлен в крупном масштабе угол рамы с натянутой и распаянной проволокой. На Рис.14 изображен станок для намотки рам проволокой.

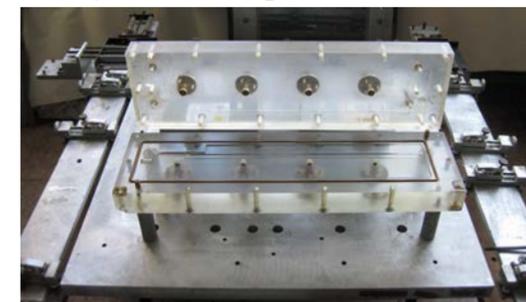


Рис 10. Пресс-форма для вакуумного литья в открытом состоянии

Выводы

1. Имеющиеся изготовленные рамы с проволочками и оборудование и инфраструктура для производства таких рам позволяют производить позиционно-чувствительные детекторы медленных нейтронов рабочей площадью $400 \times 400 \text{ мм}^2$;

2. Расчеты моделирования по программе Монте-Карло показали, что оптимальная толщина одного чувствительного слоя ^{10}B составляет 2,5 мкм с покрытием из алюминия толщиной не более, чем 0,2 мкм;
3. Эффективность регистрации нейтронов для детектора из двух слоев ^{10}B будет составлять ~10% при длине волны 1,82Å и 18% при 8Å и она может быть увеличена до 41% при 1,82Å и до 62% при 8Å для детектора из десяти слоев, что соответствует лучшим мировым образцам с рекордной рабочей площадью 400×400 мм² для такого типа детекторов;
4. Пространственное разрешение такого детектора будет составлять 4 мм с временным разрешением ~1 мкс для рабочего газа при нормальных условиях и может быть уменьшено при повышении давления газа;
5. Разрабатывается электроника сбора данных и две системы регистрации на основе модулей КАМАК и VME TDC-2 и на основе сигнальных процессоров с аналого-цифровым преобразователем CAEN DT5720;
6. Разрабатывается программное обеспечение к системам сбора данных в ОС *Linux*.

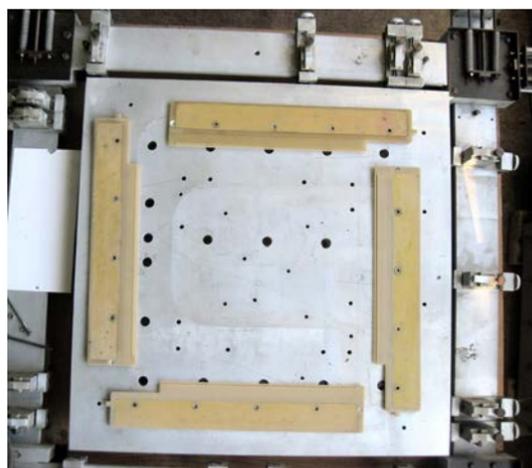


Рис.11. Подготовка к склеиванию рамы пропорциональной камеры. Рама склеивается из четырех сторон с приклеиванием печатных электродов, на которые распаиваются разъемы или непосредственно дискретные элементы распределенной линии задержки. Стороны рамы изготовлены методом вакуумного литья в форме, изготовленной с точностью 20 мкм. Состав материала рамы: 50% эпоксидный компаунд K115 и 50% кварцевый песок

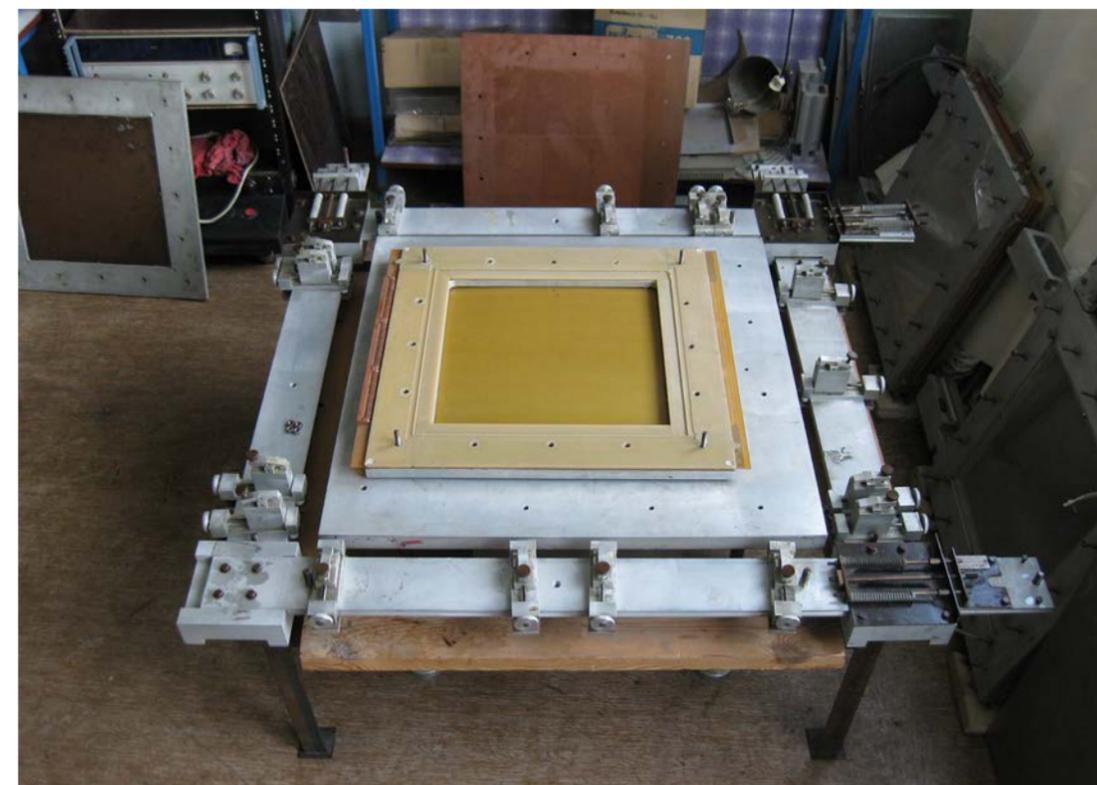


Рис 12. Стол для склеивания рам. Устройство для натяжения пленки и изготовления рам с пленочными электродами или рам с электродами из фольги. Размер стола 800×800 мм²

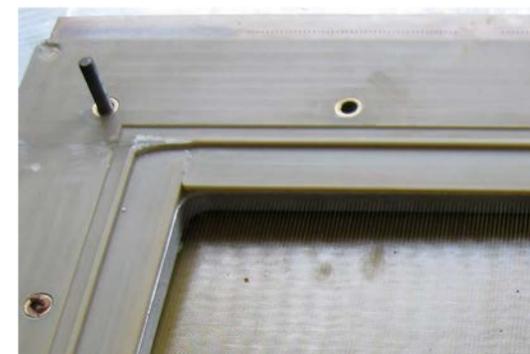


Рис 13. Угол рамы пропорциональной камеры с проволокой



Рис 14. Двухкоординатная пропорциональная камера с чувствительной областью 400 × 400 мм² в собранном виде

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В.Л. Нейтронография купратных высоко-температурных сверхпроводников // Успехи Физических Наук. 2002. Т. 172, № 6. С. 701–705.
2. 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. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исслед. 2014. № 10. С.19–25.
3. Lauter-Pasyuk V., Lauter H.J., Gordeev G.P., Muller-Buschbaum P., Toperverg B.P., Jernenkov M. and Petry W. Nanoparticles in Block-Copolymer Films Studied by Specular and Off-Specular Neutron Scattering // Appl. Phys. A. (2003). V.19. Suppl. P.7783-7788.
4. Smith J.C., Knelle G.R. Combination of Neutron Scattering and Molecular Dynamics to Determine Internal Motions in Biomolecules // Molecular Simulation (1993) V.10, P.363-375.
5. Efremov R., Shiryaeva G., Bueldt G. et al. SANS investigations of the lipidic cubic phase behaviour in course of bacteriorhodopsin crystallization // J. of Cryst. Grow. 2005. V. 275. P.1453–1459.
6. Bleuela M., Carpentera J.M., Micklicha B.J., Geltenbort P., Mishima K., Shimizu H.M., Iwashita Y., Hirota K., Hino M., Kennedy S.J., Lala J. A small angle neutron scattering (SANS) experiment using very cold neutrons (VCN) // Physica B; Condensed Matter. 2009. V. 404, iss.17. P. 2629–2632.
7. Andriamonje S., Cano-Ott D., Delbart A., Derré J., Díez S., Giomataris I., González-Romero E.M., Jeanneau F., Karamanis D., Leprêtre A., Papadopoulos I., Pavlopoulos P., Villamarin D. Experimental studies of a Micromegas neutron detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 481 (2002) 120–129.
8. Драчев А.И., Поташев С.И. Патент РФ № 2282215, подача заявки:2004-07-01, публикация патента 20.08.2006.
9. Литвин В.С., Поташев С.И., Разин В.И., Садыков Р.А. Позиционно чувствительный проволочно стриптовый детектор тепловых и холодных нейтронов с борным конвертером // Известия РАН. Серия Физическая. 2011. Т. 75, No. 2. 247-251.
10. Gervino G., Balma M., Devona D., Lavagno A., Palmisano C., Zamprotta L., Scarfone A., Tintori C. Preliminary results of a new boron coated neutron detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A. V. 718, 1 August 2013, Pages 143–144.
11. 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. V.628. Iss. 1. P.9–18
12. Andriamonje S., Calviani M., Kadi Y., Losito R. and Vlachoudis V., Berthoumieux E., Gunsing F., Giomataris Y. and Papaevangelou T., Guerrero C., Colonna N., Weiss C. A New 2D-micromegas Detector for Neutron Beam Diagnostic at n TOF // Journal of the Korean Physical Society. V. 59, No. 2, August 2011. P. 1601–1604.
13. Zhehui Wang, Hoffbauer M.A., Morris C.L., Callahan N.B., Adamek E.R., Bacon J.D., Blatnik M., Brandt A.E., Broussard L.J., Clayton S.M., Cude-Woods C., Currie S., Dees E. B., Ding X., Gao J., Gray F.E., Hickerson K.P. , Holley A.T., Ito T.M., Liu C.-Y., Makela M., Ramsey J.C., Pattie R.W., Jr., Salvat D.J., Saunders A., Schmidt D.W., Schulze R.K., Seestrom S.J., Sharapov E.I., Sprow A., Tang Z., Wei W., Wexler J., Womack T.L., Young A.R., Zeck B.A. A multilayer surface detector for ultracold neutrons. arXiv1503.03424v3[physicsins-det]24Apr2015