

DETECTORS AND NUCLEAR RADIATION DETECTION

УДК 539.1.074.5: 620.179.152

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ДВУХКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ Si-ДЕТЕКТОРОВ И ГАДОЛИНИЕВОГО КОНВЕРТОРА

*Г.П. Васильев, А.С. Деев, В.Н. Дубина, С.К. Киприч, А.А. Каплий, Н.И. Маслов,
В.Д. Овчинник, С.М. Потин, V. Sharyu¹, М.Ю. Шулика, В.И. Яловенко*
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;*

*¹The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA), Saclay, France
E-mail: nikolai.maslov@kipt.kharkov.ua*

Разработана блок-схема и выполнено макетирование малогабаритной двухканальной спектрометрической детектирующей системы для регистрации тепловых нейтронов. Спектрометрическая система создается на основе кремниевых планарных неохлаждаемых детекторов и конвертора из металлического гадолиния. Разработана методика измерения плотности потока (флюенса) тепловых нейтронов для применения в ядерной физике и ядерной медицине. Двухдетекторная спектрометрическая система на основе планарных Si-детекторов и Gd-конвертора позволяет выполнять регистрацию тепловых нейтронов по выходу конверсионных электронов с возможностью учета фонового излучения. В экспериментах использовались источник быстрых нейтронов ²³⁹Pu-Be (α, n) и парафиновый замедлитель.

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация тепловых нейтронов спектрометрической детектирующей системой на основе кремниевых планарных неохлаждаемых детекторов (КПНД) и конвертора из металлического гадолиния предъявляет особые требования к энергетическому разрешению детекторов, так как конверсионные электроны, образующиеся при захвате нейтронов гадолинием, имеют низкую энергию [1].

Для обеспечения высоких электрофизических характеристик и высокого энергетического разрешения при создании КПНД используется высокоомный кремний бестигельной зонной плавки, в основном, p-типа. КПНД изготавливаются на стабильно работающих микроэлектронных предприятиях с использованием наработанных десятилетиями технологий изготовления интегральной микроэлектроники [2].

Кремниевые планарные неохлаждаемые детекторы получили максимальное развитие при разработке и создании трековых систем суперколлайдерных экспериментов физики высоких энергий [3 - 7]. Детектирующие системы на базе КПНД обладают хорошим энергетическим разрешением при комнатной температуре, высокими пространственным и временным разрешениями, высокой эффективностью регистрации низкоэнергетического рентгеновского излучения.

При разработке многоканальных Si-детекторов [8] проектировались одноканальные КПНД в виде тестовых структур для измерения отдельных электрофизических характеристик детекторов. Одноканальные КПНД могут иметь также самостоятельное применение в ядерно-физических исследованиях и прикладное применение в медицинской диагностике, системах неразрушающего контроля и системах контроля окружающей среды.

В работе [1] с применением одноканального КПНД показана возможность создания герметизированного детекторного модуля для одновременной регистрации рентгеновского излучения и низкоэнергетических электронов, образующихся в металлическом гадолинии при захвате тепловых нейтронов.

В настоящей работе представлена блок-схема двухканальной спектрометрической детектирующей системы для регистрации тепловых нейтронов. В первом канале спектрометрической системы детектирующий модуль содержит только кремниевый детектор с размерами активной области 5×5 мм и толщиной 0,3 мм. Во втором канале детектирующий модуль содержит кремниевый детектор с металлическим Gd-конвертором. В работе описывается также методика определения плотности потока тепловых нейтронов с возможностью исключения фонового излучения.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗРЕШЕНИЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАНАРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

На Рис. 1 представлена микрофотография одноканального КПНД.

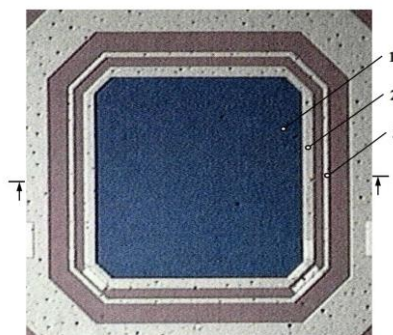


Рис. 1. Микрофотография одноканального КПНД:
1 – рабочая область детектора;
2 – считывающий электрод; 3 – защитное p⁺-кольцо

Одноканальный КПНД, представленный на рисунке, имеет сложную конструкцию. Основным активным дополнительным элементом одноканального КПНД является защитное p^+ -кольцо (3), выполненное в виде самостоятельного кольцевого детектора. P^+ -кольцо улучшает характеристики детектора, в том числе и энергетическое разрешение, так как закорачивает на себя краевые токи детектора. Поверхность рабочей области детектора не металлизирована. Это уменьшает толщину мертвого слоя рабочей области КПНД. Для сбора заряда с рабочей области КПНД по её краю выполнено тонкое металлизированное кольцо (2).

P^+ -кольцо также ограничивает рабочую область детектора. Это важно для определения плотности потока частиц и будет рассмотрено в 3 разделе статьи.

На Рис. 2 показаны результаты измерений спектра γ -излучения изотопного источника ^{241}Am одноканальным неохлаждаемым Si-детектором с размерами рабочей области 2×2 мм и толщиной 0,3 мм.

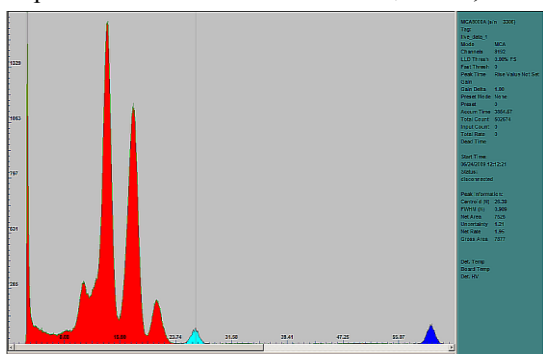


Рис. 2. Результаты измерений спектра γ -излучения изотопного источника ^{241}Am неохлаждаемым кремниевым детектором: голубой пик соответствует линии излучения с энергией 26,35 кэВ источника ^{241}Am

Рентгеновские кванты регистрировались герметизированным детектирующим модулем с входной алюминиевой фольгой толщиной 7 мкм. Энергетическое разрешение 0,9 кэВ для линии излучения с энергией 26,35 кэВ (голубой пик) источника ^{241}Am . Измерения проводились с помощью предварительного усилителя с резистивной обратной связью, изготовленного в ННЦ ХФТИ.

Для экспериментальных исследований энергетического разрешения КПНД применялось также характеристическое рентгеновское излучение (ХРИ), возбуждаемое в различных материалах (Рис. 3 и 4).

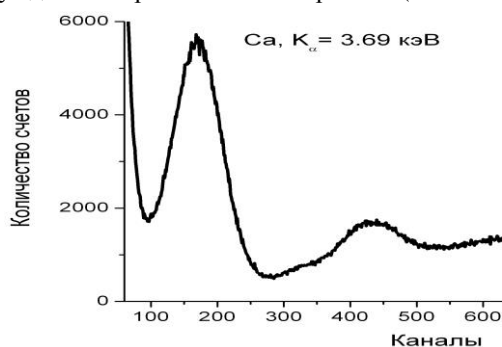


Рис. 3. Результаты измерений линии ХРИ кальция

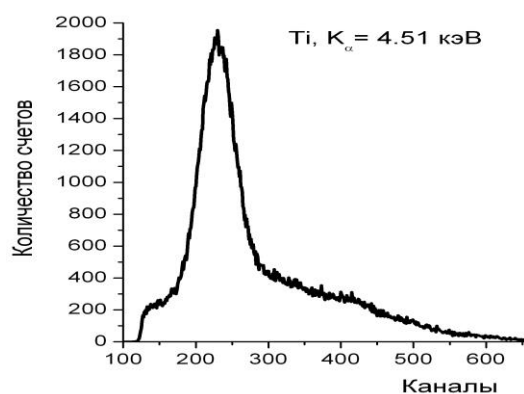


Рис. 4. Результаты измерений линии ХРИ титана

ХРИ Ca и Ti возбуждалось рентгеновской трубкой с максимумом тормозного излучения 10 кэВ. Из Рис. 3 и 4 видно, что линии ХРИ Ca и Ti с энергией 3,69 и 4,51 кэВ уверенно регистрируются.

Малая толщина мертвого слоя КПНД (порядка 1 мкм) позволяет регистрировать и измерять энергию низкоэнергетических частиц, что очень важно при разработке спектрометрической детектирующей системы для регистрации тепловых нейтронов с использованием металлического гадолиниевого конвертора.

2. ЭЛЕКТРОНИКА ДВУХКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Блок-схема двухканальной спектрометрической детектирующей системы состоит из двух детектирующих модулей, двух зарядочувствительных усилителей, двух спектрометрических усилителей, двух USB-блоков питания и двух спектрометрических АЦП, подключенных к компьютеру или ноутбуку.

Блок-схема двухканальной спектрометрической детектирующей системы представлена на Рис. 5.

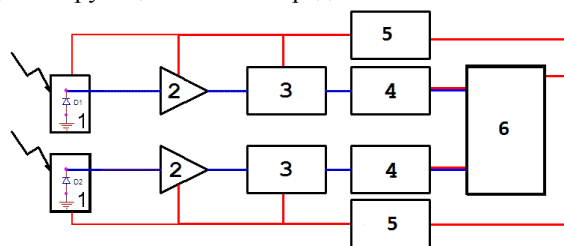


Рис. 5. Блок-схема двухканальной спектрометрической детектирующей системы:

1 – детектирующие модули; 2 – зарядочувствительные усилители; 3 – спектрометрические усилители; 4 – спектрометрические АЦП; 5 – DC/DC-преобразователи; 6 – компьютер или ноутбук

Зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) представляет из себя усилитель постоянного тока, способный работать с планарными детекторами емкостью до 10 пФ и входным током до 10 нА (при 250 МОм резисторе обратной связи). ЗЧУ спроектирован в виде усилителя постоянного тока с коэффициентом усиления с разомкнутой обратной связью не менее 80 дБ и частотой единичного усиления не менее 200 МГц.

На входе ЗЧУ применяется полевой транзистор с током утечки не более 5 пА (при температуре 25°C) и высокой крутизной ≈ 22 мА/В (также при температуре 25°C). Указанные характеристики обеспечива-

ют на частоте 100 кГц низкий шум (0,8 нВ/√Гц), приведенный к входу ЗЧУ с нулевой емкостью на входе. Типичный коэффициент передачи усилителя не менее 1 В/пКл. Типичное время нарастания сигнала 10...90% на выходе ЗЧУ не превышает 50 нс при 2 пФ емкости детектора. Динамический диапазон сигналов на выходе не менее 2 В. На Рис. 6 представлена упрощенная схема зарядочувствительного усилителя.

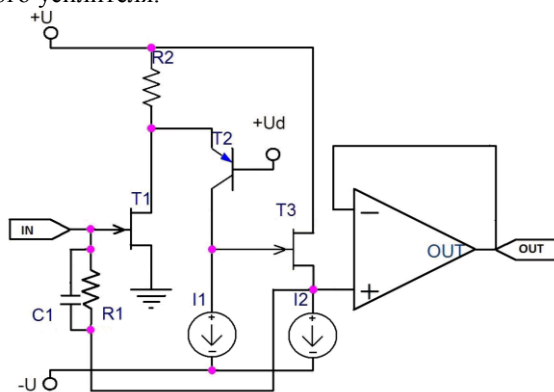


Рис. 6. Упрощенная схема зарядочувствительного усилителя

Транзистор T1 – малошумящий JFET с малой емкостью $C_{gs} < 8$ пФ и низким током затвора $I_g < 1$ пА, который обеспечивает высокое входное сопротивление схемы. Сигнал с детектора подается непосредственно на затвор транзистора T1, что обеспечивает минимальное искажение сигнала. Резистор R2 задает ток стока T1. Напряжение на стоке T1 задается напряжением на базе транзистора T2. Транзистор T2 подключен с транзистором T1 в каскад сток-эмиттер с целью гашения эффекта Миллера на входе схемы, что существенно уменьшает эффективную входную емкость ЗЧУ и его шум, а также значительно улучшает частотную передаточную характеристику. Коллектор T2 нагружен на генератор тока I1, что обеспечивает высокий коэффициент усиления с разомкнутой обратной связью. Типичный рабочий ток транзистора T2 равен 0,1 мА, что достаточно для того, чтобы не снизить частотную характеристику транзистора. Вместе с тем это достаточно низкий ток, чтобы не вызвать увеличение приведенного к входу последовательного шума. Транзистор T3 работает как буфер с высоким входным сопротивлением между коллектором T2 и обратной связью. Цепь обратной связи состоит из высокоомного резистора R1 и конденсатора малой емкости C1. Типовая конфигурация – 1 Гом резистор R1 и 1 пФ конденсатор C1, что даёт константу экспоненциального затухания сигнала на выходе схемы 1 мкс. Выход ЗЧУ еще дополнительно буферизирован операционным усилителем.

На Рис. 7 показана осциллограмма отклика ЗЧУ на заряд, пришедшего от детектора, подключенного к входу усилителя.

Это экспоненциально затухающий импульс, передний фронт которого определяет время сбора заряда в детекторе и время нарастания сигнала в ЗЧУ. Типичное значение времени нарастания сигнала для представленной выше схемы (см. Рис. 6) равно 50 нс

при емкости детектора 2 пФ. Время затухания сигнала зависит от константы времени обратной связи зарядочувствительного усилителя, и типичное его значение 1 мкс. Это время затухания задает максимальную загрузку (импульсов в секунду) от детектора, так как в случае наложения сигналов появятся искажения радиационного спектра.

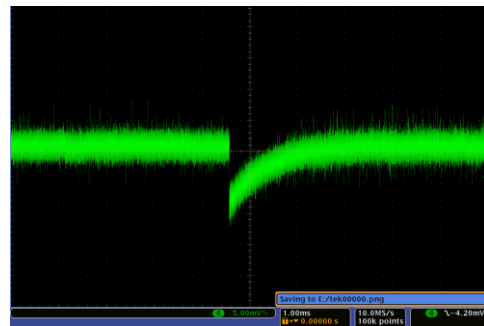


Рис. 7. Типичная осциллограмма импульса на выходе ЗЧУ. Время нарастания сигнала 50 нс, время затухания 1 мкс

На Рис. 8 показана частотная характеристика ЗЧУ, полученная с помощью пакета анализа PSpice A/D.

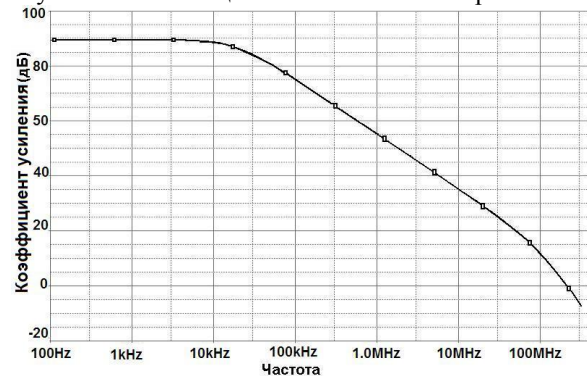


Рис. 8. Зависимость модуля коэффициента усиления ЗЧУ с разомкнутой обратной связью от частоты

Частота единичного усиления не менее 200 МГц, а спад частотной характеристики 6 дБ/октаву наблюдается до 20 дБ, что при емкости входного транзистора 7...8 пФ позволяет стабильно работать с детекторами емкостью 2 пФ при 1 пФ конденсаторе в цепи обратной связи.

На Рис. 9 показана зависимость от частоты величины шума ЗЧУ, приведенного к эквивалентной входной емкости детектора в 2 пФ.

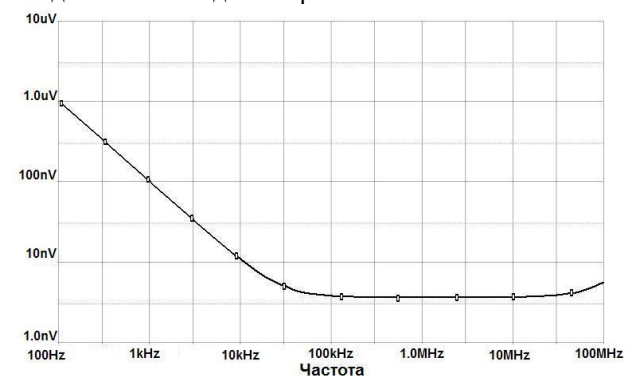


Рис. 9. Частотная характеристика величины шума ЗЧУ, приведенного к входной емкости детектора

Минимальный шум достигается в частотной полосе от 100 кГц до 10 МГц, что позволяет работать с относительно короткими сформированными выходными импульсами со временем пика сигнала от 0,5 до 2 мкс. Указанный диапазон является типичным временем формирования сигналов CR-RC-формирователями для неохлаждаемых кремниевых детекторов при комнатной температуре.

Импульсы с зарядочувствительного усилителя необходимо фильтровать для достижения максимального отношения сигнала/шум. Полоса частот, в которой полезный сигнал имеет наибольшую энергию, выделяется при фильтрации, и подавляются те частоты, где доминирует шум. Достаточно оптимальным фильтром для полупроводниковых детекторов является семи-гауссовый CR-(RC)ⁿ фильтр, позволяющий удобно менять константы времени фильтра путем переключения конденсаторов в схеме. Фильтр имеет коэффициент превышения шума $K_{п.ш.} = 1,16$ для 4-кратного интегрирования.

На Рис. 10 показана упрощенная принципиальная схема реализации формирующего усилителя для случая четырех интегрирующих фильтров CR-(RC)⁴.

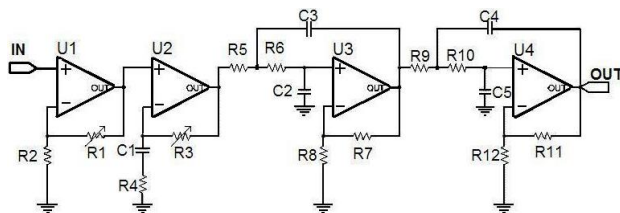


Рис. 10. Упрощенная принципиальная схема усилителя формирователя CR-(RC)⁴

Входной каскад на операционном усилителе U1 служит буфером, что обеспечивает высокое входное сопротивление на входе и предварительное усиление слабого сигнала с ЗЧУ до необходимой величины. Схема на U2 позволяет выполнять ноль-полосную компенсацию в экспоненциально затухающем сигнале с ЗЧУ, которая необходима для стабилизации базовой линии при высоких количествах импульсов в секунду с детектора. Сигнал интегрируется в секциях U3 и U4, которые выполнены как фильтры низкой частоты по схеме Саллена-Ки.

На Рис. 11 показана осциллограмма сформированного импульса на выходе усилителя формирователя со временем формирования $t_{pk} = 2$ мкс.

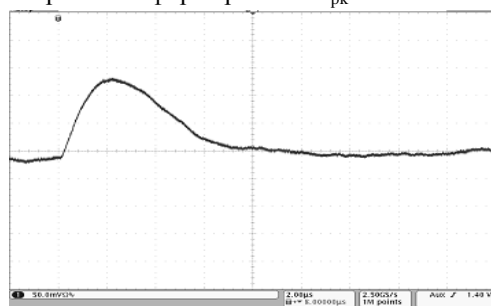


Рис. 11. Семи-гауссовый импульс на выходе усилителя формирователя

Общая длительность сформированного импульса около $3 \cdot t_{pk}$. Для оптимальной фильтрации сигналов с планарных детекторов при комнатных температурах экспериментально установлено, что при формирова-

нии пика до 1,5 мкс дает наилучший результат, так как ток неохлажденного детектора дает дополнительный низкочастотный шум, снижая отношение сигнал/шум при импульсах с длинным фронтом.

Напряжение USB-интерфейса компьютера (+5 В) используется в качестве первичного источника питания для удобства применения будущего устройства. USB-интерфейс широко применяется и дает возможность потребления мощности до 3,5 Вт. Для реализации всех необходимых питающих напряжений, используемых в спектрометрическом устройстве, был применен DC/DC-преобразователь со следующими характеристиками.

Характеристики DC/DC-преобразователя

Входные характеристики	
Диапазон напряжения	$\pm 10\%$
Входное напряжение	5 В
Входной ток без нагрузки	30 мА
Входной ток при полной нагрузке	300 мА
Выходные характеристики	
Выходное напряжение	± 12 В
Выходной ток при полной нагрузке	± 50 мА
Точность напряжения	$\pm 3\%$
Защита от короткого замыкания	Есть
Пулсация и шум (при 20 МГц полосе пропускания)	100 мВ
Температурный коэффициент	$\pm 0,02\%/^{\circ}\text{C}$

На Рис. 12 показана структурная схема DC/DC преобразователя.

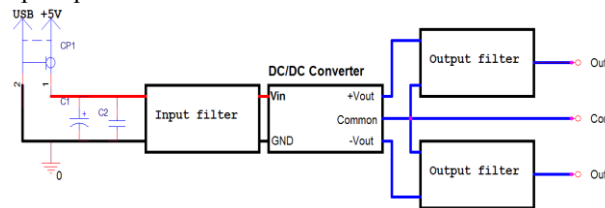


Рис. 12. Структурная схема DC/DC-преобразователя

В него входит входной фильтр с сглаживающими элементами C1 и C2, DC/DC-преобразователь с двойным выходом. Выходные напряжения преобразователя через соответствующие фильтры подаются в схемы усилителей.

Питание двухканального спектрометрического модуля осуществляется от USB-порта, потребляемая мощность не более 2 Вт.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА (ФЛЮЕНСА) ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

Методика измерения плотности потока тепловых нейтронов основывается на регистрации неохлаждаемыми Si-детекторами низкоэнергетических конверсионных электронов, образующихся в металлическом гадолинии при захвате нейтронов. Поэтому для измерения плотности потока нейтронов спектрометрической системой на основе неохлаждаемых детекторов необходимо обеспечить достаточные энергетическое и пространственное разрешения, а также стабильность спектрометрической системы. Дости-

жению этих целей способствует, прежде всего, конструкция применяемых КПНД.

На Рис. 13 показано упрощенное поперечное сечение одноканального планарного кремниевого детектора с p^+ -защитным кольцом.

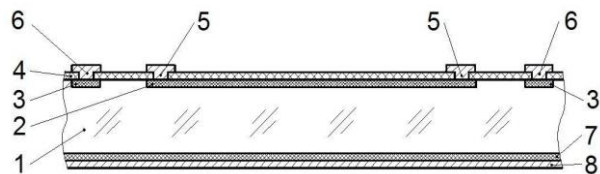


Рис. 13. Упрощенное поперечное сечение одноканального планарного кремниевого детектора с p^+ -защитным кольцом: 1 – высокоомный кремний n -типа толщиной 300 мкм; 2 – имплантация p/n -перехода активной области детектора; 3 – p/n -переход p^+ -защитного кольца; 4 – окисный слой SiO_2 ; 5 – Al кольцо для сбора заряда с активной области; 6 – Al кольцо p^+ -защитного кольца; 7 – n^+ -имплантация обратной стороны детектора; 8 – Al обратной стороны детектора

p^+ -защитное кольцо 3 кроме улучшения энергетического разрешения детектора также улучшает пространственное разрешение детектора. Защитное p^+ -кольцо очень точно ограничивает рабочую область детектора. Край активной области детектора располагается посередине зазора между краем имплантации p/n -перехода активной области детектора и краем имплантации p/n -перехода p^+ -защитного кольца. Величина зазора между краем имплантации p/n -перехода активной области детектора и краем имплантации p/n -перехода p^+ -защитного кольца равняется 100 мкм.

На Рис. 14 представлено полное описание поперечного сечения края одноканального планарного кремниевого детектора.

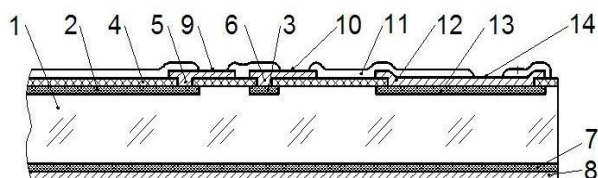


Рис. 14. Поперечное сечение края одноканального планарного кремниевого детектора: 1 – 8 – то же, что и на Рис. 13; 9 и 10 – контактные алюминиевые площадки к p/n -переходам активной области детектора и p^+ -защитного кольца; 11 – пассивирующий (защитный) слой окисла SiO_2 , покрывающий всю поверхность детектора, за исключением контактных площадок; 12 – Al кольцо к омической токопроводящей имплантации (13) n^+ -кольца; 14 – контактная Al площадка n^+ -защитного кольца

Защитное омическое токопроводящее n^+ -кольцо уменьшает напряжение смещения к краю детектора для долговременной стабилизации характеристик детектора.

На Рис. 15 представлены результаты испытаний долговременной стабильности макета двухканальной спектрометрической детектирующей системы для регистрации тепловых нейтронов на основе кремниевых планарных неохлаждаемых детекторов и конвертора из металлического гадолиния.

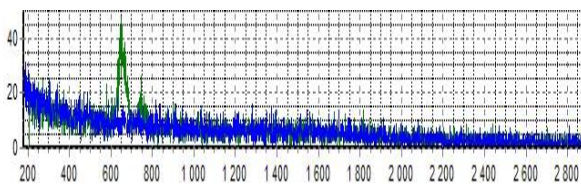


Рис. 15. Результаты испытаний долговременной стабильности макета двухканальной спектрометрической детектирующей системы. Ось x : каналы АЦП, ось y : количество событий, зарегистрированное в течение 15 сут.

Синяя гистограмма соответствует детектору без Gd, зеленая – для детектора с Gd

Макет двухканальной спектрометрической детектирующей системы испытывался непрерывно в течение 15 сут. для определения долговременной стабильности и интенсивности шумовых событий. Как видно из рисунка, в диапазоне каналов 500...2500 наблюдается одно или менее одного шумового события в канале за сутки. Синяя (детектор без Gd) и зеленая (детектор с Gd) линии совпадают, за исключением диапазона от 600 до 800 канала. В этом диапазоне каналов на зеленой линии наблюдаются два пика ХРИ гадолиния, инициированные космическим излучением.

На Рис. 16 показано спектральное распределение излучения $^{239}Pu-Be$ (α, n)-источника нейтронов с парафиновым замедлителем толщиной 4 см, измеренное с помощью макета двухканальной спектрометрической системы.

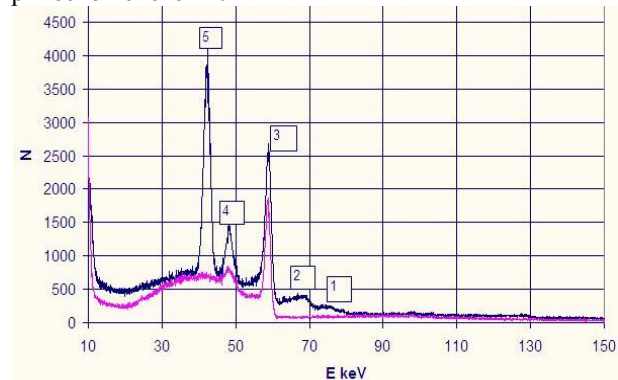


Рис. 16. Спектральные распределения излучения $^{239}Pu-Be$ (α, n)-источника нейтронов, измеренные с помощью макета двухканальной спектрометрической системы при толщине парафинового замедлителя 4 см: нижняя кривая – спектральное распределение, измеренное спектрометрическим каналом с детектором без конвертора. Верхняя кривая – спектральное распределение, измеренное спектрометрическим каналом с Gd-конвертором. Время измерения $T1 = 82591$ с

Методика определения плотности потока нейтронов заключается в анализе данных по обоим каналам спектрометрической системы и выделении сигнала от электронов конверсии. В диапазоне ожидаемого сигнала от конверсионных электронов от 60 кэВ и выше [1, 9] можно наблюдать отклонения распределения данных по каналу детектора без гадолиния по отношению к каналу с гадолиниевым конвертором. Определение плотности потока тепловых нейтронов зависит от количества зарегистрирован-

ных электронов конверсии через коэффициент вероятности регистрации конверсионных электронов.

Из приведенного Рис. 16 можно видеть, что пики конверсионных электронов 1 и 2 с энергиями 71 и 78 кэВ хорошо различаются. Максимум 3 с энергией 59,5 кэВ является линией ХРИ америция, которая излучается источником нейтронов. Максимумы 4 и 5 являются линиями ХРИ гадолиния.

Так как макет двухканальной спектрометрической системы изготовлен с использованием КПНД с размерами рабочих областей 5×5 мм (т.е. площадь рабочей области равна 0,25 см²), то плотность потока тепловых нейтронов W_n определяется из соотношения:

$$W_n = \sum e \cdot K_n / 0,25 \cdot \Delta T, 1/(\text{см}^2 \cdot \text{с}),$$

где W_n – плотность потока тепловых нейтронов; $\sum e$ – сумма конверсионных электронов, измеренная в определенном интервале энергий за определенный промежуток времени с помощью макета двухканальной спектрометрической системы; K_n – коэффициент соответствия суммы конверсионных электронов, измеренных в определенном интервале энергий за определенный промежуток времени с числом тепловых нейтронов, измеренных за тот же промежуток времени калибровочным устройством.

Для определения коэффициента соответствия применен диапазон энергий конверсионных электронов 60...80 кэВ. Время измерения $T_1 = 82591$ с для спектра, приведенного на Рис. 16. Для калибровки при определении коэффициента соответствия использован стандартный, поверенный прибор РМ-21Р. Величина коэффициента соответствия K_n из полученных данных составляет 104,2.

На Рис. 17 показано повторное измерение спектрального распределения излучения ²³⁹Pu-Be источника с парафиновым замедлителем толщиной 4 см, время измерения $T_2 = 129826$ с.

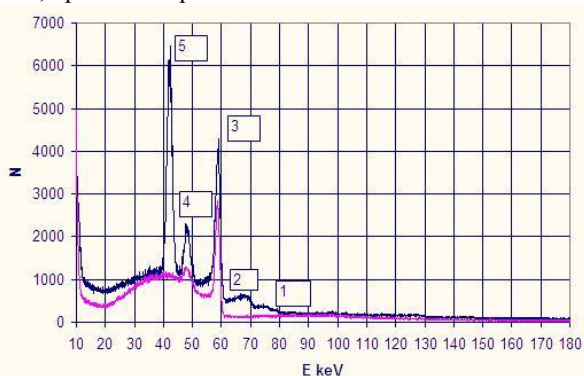


Рис. 17. Результаты повторного измерения спектрального распределения излучения ²³⁹Pu-Be источника нейтронов макетом двухканальной спектрометрической системы при толщине парафинового замедлителя 4 см и времени измерения $T_2 = 129826$ с

Величина коэффициента соответствия K_n , определенная из данных Рис. 17, составляет 104,4. Хорошая повторяемость коэффициента соответствия K_n свидетельствует о высокой точности метода измерения плотности потока тепловых нейтронов.

ВЫВОДЫ

Разработана блок-схема и выполнено макетирование малогабаритной двухканальной спектрометрической детектирующей системы для регистрации тепловых нейтронов. Спектрометрическая система создается на основе кремниевых планарных неохлаждаемых детекторов и конвертора из металлического гадолиния.

Разработана методика измерения плотности потока (флюенса) тепловых нейтронов для применения в ядерной физике и ядерной медицине. Экспериментально определен коэффициент соответствия K_n суммы конверсионных электронов, измеренных в определенном интервале энергий за определенный промежуток времени с числом тепловых нейтронов, измеренных за тот же промежуток времени калибровочным устройством. Величина коэффициента соответствия K_n , определенная из экспериментальных данных Рис. 16 и 17, составляет 104,4.

Показано, что двухдетекторная спектрометрическая система на основе планарных Si-детекторов и Gd-конвертора позволяет выполнять регистрацию тепловых нейтронов по выходу конверсионных электронов с возможностью учета фонового излучения. В экспериментах использовались источник быстрых нейтронов ²³⁹Pu-Be (α, n) и парафиновый замедлитель.

Статья содержит результаты исследований, проведенных при грантовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований по конкурсному проекту № Ф79/128-2017. Исследование было проведено в рамках IDEATE Международной ассоциированной лаборатории (LIA).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Г.П. Васильев, А.С. Деев, С.К. Киприч, А.А. Каплий, Н.И. Маслов, В.Д. Овчинник, С.М. Потин, М.Ю. Шулика, В.И. Яловенко. Модуль для регистрации тепловых нейтронов на основе неохлаждаемого кремниевого детектора и металлического гадолиниевого конвертера // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2016, в. 3(103), с. 99-104.
2. Н.И. Маслов. Физические и технологические аспекты создания и применений кремниевых планарных детекторов // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «ФРПМ»*. 2013, №2 (84), с. 165-171.
3. Y. Unno. ATLAS silicon microstrip detector system (SCT) // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2003, A 511, p. 58-63.
4. The ALICE Collaboration, K. Aamodt, et al. The ALICE Experiment at the CERN LHC, 2008_JINST_3_S08002.
5. CMS installs the world's largest silicon detector, CERN Courier, Feb 15, 2008
6. C. Aidala et al. The PHENIX Forward Silicon Vertex Detector, arXiv:1311.3594 [physics.ins-det], DOI: 10.1016/j.nima.2014.04.017.

7. Benjamin Buck, Eric Anderssen, Jason Bessuille, Mario Cepeda, Thomas Johnson, James Kelsey, Gerit van Nieuwenhuizen, Gerard Visser. Design and Fabrication of a Highly Integrated Silicon Detector for the STAR Experiment at Brookhaven National Laboratory // arXiv:1404.0993v1 [physics.ins-det] 3 Apr 2014.
8. N. Maslov, V. Kulibaba, S. Potin, A. Starodubtsev, P. Kuijjer, A.P. de Haas, V. Perevertailo. Radiation tolerance of single-sided microstrip detector with Si₃N₄ insulator // *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*. 1999, № 78, p. 689-694.
9. V.N. Dubina, S.K. Kiprich, N.I. Maslov, V.D. Ovchinnik. Thermal Neutrons Detection Module Capable of Electron and Gamma-Separation and Background Suppression // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, № 5, p. 88-93.

Статья поступила в редакцию 13.03.2018

TECHNIQUE OF THERMAL NEUTRONS REGISTRATION BY TWO-CHANNEL SPECTROMETRIC SYSTEM BASED ON UNCOOLED SI-DETECTORS AND GADOLINIUM CONVERTER

G.P. Vasylyev, O.S. Deiev, V.M. Dubina, S.K. Kiprich, O.A. Kapliy, M.I. Maslov, V.D. Ovchinnik, S.M. Potin, V. Sharyu, M.Ju. Shulika, V.I. Yalovenko

A block diagram was developed and a working model of a small-sized two-channel spectrometric detection system was produced for thermal neutrons registration. The spectrometric system is created on the basis of silicon planar uncooled detectors and a converter made of metallic gadolinium. A technique has been developed for measuring the flux density (fluence) of thermal neutrons for use in nuclear physics and nuclear medicine. A two-detector spectrometric system based on planar Si detectors and Gd converter allows thermal neutrons registration using the conversion electrons output with the possibility of background radiation accounting. The fast neutron source ²³⁹Pu-Be (α , n) and the paraffin moderator were used in the experiments.

МЕТОДИКА РЕЄСТРАЦІЇ ТЕПЛОВИХ НЕЙТРОНІВ ДВОКАНАЛЬНОЮ СПЕКТРОМЕТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ НА ОСНОВІ НЕОХОЛОДЖУВАНИХ Si-ДЕТЕКТОРІВ І ГАДОЛІНІЄВОГО КОНВЕРТОРА

Г.П. Васильєв, О.С. Деєв, В.М. Дубина, С.К. Кіпріч, О.А. Каплій, М.І. Маслов, В.Д. Овчинник, С.М. Потін, В. Шаруу, М.Ю. Шуліка, В.І. Яловенко

Розроблено блок-схему і виконано макетування малогабаритної двоканальної спектрометричної детектуючої системи для реєстрації теплових нейтронів. Спектрометрична система створюється на основі кремнієвих планарних неохолоджуваних детекторів і конвертора з металевого гадолінію. Розроблено методику вимірювання щільності потоку (флюенсу) теплових нейтронів для застосування в ядерній фізиці та ядерній медицині. Дводетекторна спектрометрична система на основі планарних Si-детекторів і Gd-конвертора дозволяє виконувати реєстрацію теплових нейтронів по виходу конверсійних електронів з можливістю обліку фонового випромінювання. В експериментах використовувались джерело швидких нейтронів ²³⁹Pu-Be (α , n) і парафіновий сповільнювач.