

УДК 621.039.564.2:681.5.08

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ РЕГИСТРАЦИИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕННОМ МАСШТАБЕ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ 0.1 МэВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

© 2020 г. К. А. Белошицкий¹, А. С. Кошелев¹, М. В. Мочкаев¹, М. А. Овчинников¹,
Г. Н. Пикулина¹ *, И. М. Пискорский¹, Н. В. Распопов¹, В. А. Юхневич¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

*E-mail: otd4@expd.vniief.ru

Поступила в редакцию 11.05.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 26.06.2020 г.

Рассмотрены принципы работы двух автоматизированных комплексов для измерения флюенса нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ в реальном временном масштабе. Первый комплекс использует метод регистрации плотности потока нейтронов камерами деления с пороговыми радиаторами. Во втором комплексе используются кремниевые транзисторы в качестве детекторов и зависимость их коэффициента усиления тока от флюенса нейтронов.

DOI: 10.31857/S0367676520100051

ВВЕДЕНИЕ

Испытания на радиационную стойкость материалов, радиоэлектронной техники сопровождаются измерением флюенса нейтронов в месте расположения образца. При этом имеют значение миниатюрность детектора, чтобы не вносить искажение в окружающее нейтронное поле, и способность детектора формировать сигнал, пропорциональный набранному в процессе облучения флюенсу нейтронов.

Наиболее информативным и точным способом измерения флюенса нейтронов является методика активационных детекторов [1]. Достоинством этого метода является широкая информативность результатов, так как при помощи набора детекторов можно получить подробные сведения о количестве и спектральном составе поля облучения. Способ не требует дополнительной калибровки и используется, в свою очередь, для калибровки других способов. В качестве его недостатка можно рассматривать факт, что значение флюенса нейтронов получается только по завершении эксперимента после трудоемких измерений и расчетов.

Анализ результатов испытаний на радиационную стойкость и интерпретация их для реальных условий применения материалов, элементов и систем радиоэлектронной аппаратуры невозможны без детального описания условий облучения объектов. Для этого часто требуется регистрация

зависимости флюенса нейтронов от времени в процессе облучения.

Для решения этой задачи специалистами ВНИИЭФ разработаны два автоматизированных комплекса, обеспечивающих детектирование флюенса нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ в реальном временном масштабе. Первый комплекс использует метод регистрации плотности потока нейтронов камерами деления с пороговыми радиаторами и последующий расчет значений флюенса [2]. Во втором комплексе используется связь между изменением величины коэффициента усиления по току (h_{21}) применяемого в качестве детектора кремниевого транзистора $n-p-n$ типа в схеме включения с общим эмиттером и величиной набранного флюенса нейтронов [3].

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ КАМЕРАМИ ДЕЛЕНИЯ С ПОРОГОВЫМИ РАДИАТОРАМИ

Для реализации этого метода используется автоматизированный комплекс (АК), выполненный на основе специализированного многофункционального измерительного комплекса (СМИК) [4].

В качестве детектора быстрых нейтронов применяется газонаполненная ионизационная камера КНК-2-7М (камера гамма-нейтронная комби-

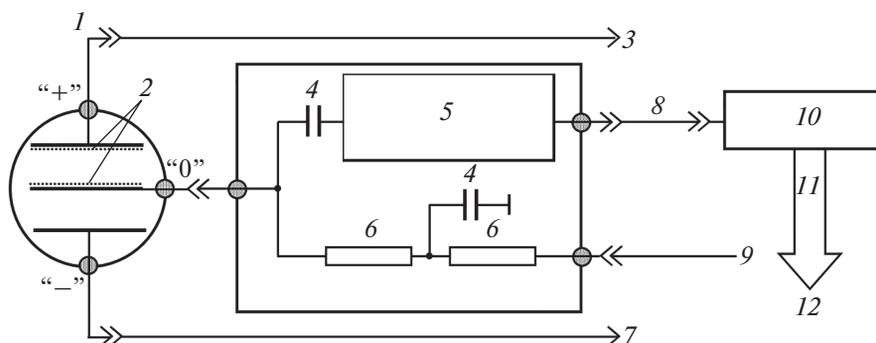


Рис. 1. Схема подключения камеры КНК-2-7М: 1 – КНК-2-7М; 2 – *n*-радиатор; 3 – кабельная линия связи к первому измерительному токовому модулю ИМТК-1; 4 – конденсатор 1 мкФ; 5 – блок согласования; 6 – сопротивление 10 МОм; 7 – кабельная линия связи ко второму измерительному токовому модулю ИМТК-2; 8 – кабельная линия связи; 9 – напряжение +500 В; 10 – усилитель-дискриминатор; 11 – волоконно-оптическая линия связи; 12 – измерительный модуль счетчика нейтронов ИМСН.

нированная) в счетном режиме работы, дополняемом переходом в токовый режим с разделением секционных токов функциональных секций. Схема подключения камеры КНК-2-7М при измерении приведена на рис. 1.

Подача однополярного напряжения питания положительной полярности на сигнальный (собирающий) электрод с маркировкой “0”, обеспечивает возможность независимой регистрации токов функциональных секций [5]. Наличие высокоомных сопротивлений на входе подачи напряжения питания ограничивает верхний регистрационный уровень секционного тока величиной $\sim 10^{-5}$ А. Характеристики ионизационной камеры, используемой в комплексе в качестве детектора, приведены в табл. 1.

Регистрации показаний детектора КНК-2-7М производится при помощи одного счетного и одного токового регистрационных каналов, содержащих блоки обработки сигналов, выполненные на микропроцессорах, данные с которых передаются и затем обрабатываются в реальном масштабе времени на вычислительном устройстве более высокого уровня. Конфигурация измерительных

каналов автоматизированного комплекса СМИК представлена на рис. 2.

В составе счетного канала используется измерительный модуль счетчика нейтронов ИМСН с диапазоном измерения скорости счета – от 0 до $1 \cdot 10^5$ имп. \cdot с $^{-1}$ при погрешности измерения скорости счета в диапазоне от 100 до $1 \cdot 10^5$ имп. \cdot с $^{-1}$ не более 1%, в диапазоне от 0 до 100 имп. \cdot с $^{-1}$ погрешность составляет ± 1 имп. \cdot с $^{-1}$.

Токовый канал состоит из двух токовых измерительных модулей ИМТК (диапазон измерения силы тока – от 10^{-11} до $2.5 \cdot 10^{-3}$ А), которые используются для отдельной регистрации секционных токов: γ -составляющей и $\gamma + n$ -составляющей исследуемого излучения. Погрешность измерения тока в диапазоне от $1 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-8} А – не более 5%, в диапазоне от 10^{-8} до $2.5 \cdot 10^{-3}$ А – не более 3%.

Для обеспечения однополярного питания по общему для секций электроду камеры используется модуль высоковольтного преобразователя напряжения ВПН-500. ВПН-500 обеспечивает высоковольтное напряжение питания в пределах от 100 до 500 В и от минус 500 до минус 100 В (вы-

Таблица 1. Характеристики ионизационной камеры КНК-2-7М

Характеристика	Значения
Фоновый ток <i>n</i> -секции, А	$2.12 \cdot 10^{-8}$
Фоновый ток γ -секции, А	$6.30 \cdot 10^{-10}$
Отношение фоновых токов	33.6
“Эффективный” вес, мг	70.8
“Эффективное” число ядер	$1.80 \cdot 10^{20}$
Нормализованная чувствительность по току, Кл/дел. ^{237}Np	$3.03 \cdot 10^{-13}$
Нормализованная чувствительность по флюенсу с порогом 0.55 МэВ, Кл \cdot см 2 /нейтрон	$8.59 \cdot 10^{-17}$

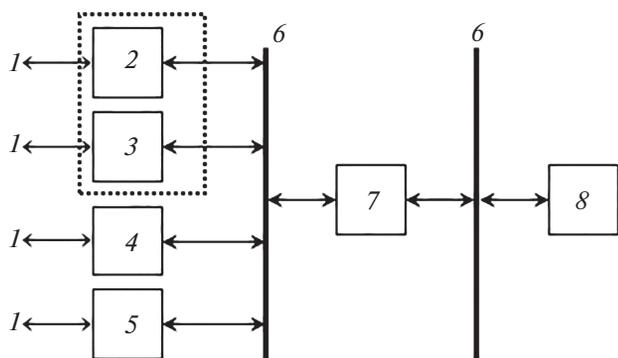


Рис. 2. Конфигурация СМИК для измерения флюенса нейтронов: 1 – подключение к КНК2-7-М; 2 – первый измерительный токовый модуль ИМТК-1; 3 – второй измерительный токовый модуль ИМТК-2; 4 – измерительный модуль счетчика нейтронов ИМСН; 5 – модуль высоковольтного преобразователя напряжения ВПН-500; 6 – линия связи в формате RS-485; 7 – блок обработки данных БОД; 8 – персональный компьютер ПК.

ходной ток – не более 5 мА, нестабильность выходного напряжения за 8 часов – не более 1%).

Все функциональные модули, используемые в составе СМИК, разработаны и изготовлены во ВНИИЭФ. На все модули получены свидетельства об утверждении типа средств измерений. На используемое программное обеспечение получено свидетельство о государственной регистрации [5].

В качестве вычислительного устройства более высокого уровня в СМИК используется микропроцессорный блок обработки данных БОД [6], разработанный также во ВНИИЭФ. БОД управляет работой функциональных модулей нижнего уровня: ИМТК, ИМСН, ВПН – по последовательной шине данных в формате RS-485, являясь на ней ведущим устройством. В свою очередь БОД, также по линии связи в формате RS-485, подключается к управляющему устройству верхнего уровня. Встроенное программное обеспечение БОД функционирует под управлением операционной системы реального времени QNX Neutrino 6.5. БОД принимает и обрабатывает результаты первичных измерений (силу тока, скорость счета) от модулей ИМТК и ИМСН, выполняет сшивку данных и вычисляет значения нейтронного потока, используя заданные на верхнем уровне коэффициенты преобразования. Результаты измерений и расчетов отображаются на индикационной панели БОД.

В качестве управляющего устройства верхнего уровня в СМИК используется персональный компьютер (ПК), на котором установлено управляющее программное обеспечение (ПО) измерительного комплекса СМИК [6]. ПО задает конфигурацию комплекса: количество и тип измерительных каналов (модулей); настраивает и обеспечивает

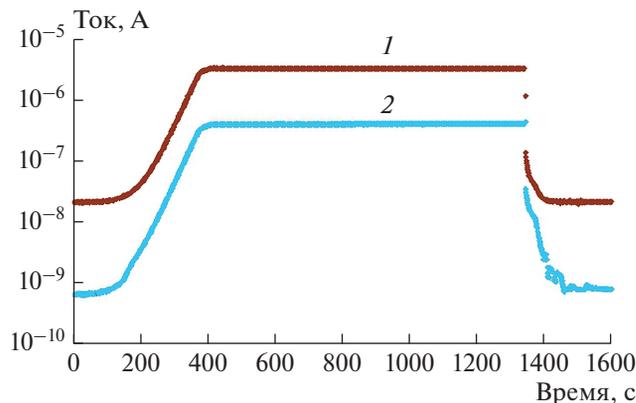


Рис. 3. Зарегистрированные секционные токи камеры КНК-2-7М при измерении флюенса: 1 – ток нейтронной секции I_n ; 2 – ток гамма-секции I_γ ; $I_{n\max}/I_{\gamma\max} = 8.2$.

связь между ПК и модулями, контролирует работоспособность аппаратуры; регистрирует с заданным периодом отклики детекторов нейтронов; в ходе регистрации вычисляет значения флюенса нейтронов; архивирует зарегистрированные и расчетные данные в текстовых файлах на ПК; в процессе измерений отображает результаты в цифровом и графическом видах на экране монитора ПК. На рис. 3 показан пример зарегистрированных данных по токовому каналу при работе исследовательского реактора БР-К1 [6].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ ДЕТЕКТОРАМИ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Одним из недостатков метода детектирования флюенса нейтронов при помощи ионизационных камер является то, что из-за низкой величины сечения взаимодействия быстрых нейтронов с изотопами радиаторов приходится наращивать габариты камер, что накладывает ограничения на их применение. При определении флюенса имеет значение именно миниатюрность детектора, чтобы не внести искажение в окружающее нейтронное поле.

Данная проблема может быть решена при использовании некоторых типов транзисторов в качестве детекторов нейтронов. При взаимодействии с полупроводниковыми материалами нейтроны с определенным энергетическим спектром образуют радиационные дефекты, количество которых пропорционально воздействию флюенсу нейтронов. Эти дефекты изменяют электрофизические свойства полупроводникового материала. Если какой-либо параметр вещества однозначно связан с количеством дефектов, то по изменению этого параметра под облучением можно определить величину воздействующего на него флюенса нейтронов [7].

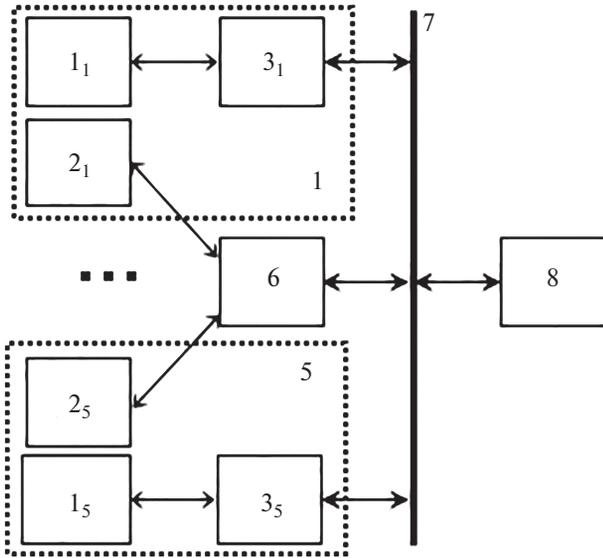


Рис. 4. Конфигурация автоматизированного комплекса для измерения флюенса нейтронов при помощи транзисторов. 1_1-1_5 – транзисторы в качестве детекторов нейтронов; 2_1-2_5 – модули измерения коэффициентов транзистора МИКТ; 3_1-3_5 – термопары; $1-5$ – измерительные каналы флюенса нейтронов; 6 – многоканальный аналоговый модуль I-7018Z для измерения температуры; 7 – линия связи в формате RS-485; 8 – персональный компьютер ПК.

Радиационные дефекты, образованные под действием нейтронного излучения, являются эффективными центрами захвата и рекомбинации носителей заряда, поэтому у кремниевых полупроводников в наибольшей степени претерпевает изменение время жизни неосновных носителей заряда [7]:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + k_\tau \cdot F, \quad (1)$$

где τ_0 – начальное время жизни носителей; τ – время жизни носителей после воздействия флюенса нейтронов F ; k_τ – константа радиационного повреждения времени жизни носителей.

Существуют типы кремниевых транзисторов $n-p-n$ типа, у которых можно определить характеристическую зависимость коэффициента усиления по току (h_{21}) от времени жизни неосновных носителей заряда [7]. С использованием этого эффекта спроектирован автоматизированный комплекс для измерения значений коэффициентов усиления кремниевых транзисторов ($n-p-n$ типа) по току (h_{21}) в схеме включения с общим эмиттером [3].

Основной целью разработки стало изучение характера зависимости коэффициентов усиления по току (h_{21}) облучаемых транзисторов от флюен-

са, а также влияния изменения температурного режима на эту зависимость. Главный итог исследования заключается в получении аналитических зависимостей для расчета значений флюенса и погрешности его измерения. На данном этапе для определения флюенса в комплексе используется следующая формула [3]:

$$F_{\text{И}}(t) = F_{\text{К}} \frac{\frac{1}{1+h_{21\text{И}}(t)} - \frac{1}{1+h_{21\text{К}}}}{\frac{1}{1+h_{21\text{К}}} - \frac{1}{1+h_{21\text{Н}}}}, \quad (2)$$

где t – текущий момент времени, $F_{\text{К}}$ – значения калибровочного флюенса нейтронов спектра образцового источника, $h_{21\text{И}}(t)$ – дифференциальный коэффициент усиления по току при рабочем облучении исследуемого транзистора, $h_{21\text{Н}}$ – дифференциальный коэффициент усиления по току до облучения спектром нейтронов образцового источника, $h_{21\text{К}}$ – дифференциальный коэффициент усиления по току после подачи калибровочного импульса спектром нейтронов образцового источника.

Программное обеспечение комплекса позволяет редактировать формулу расчета значений комплекса, не меняя конфигурации аппаратной части.

Для использования в автоматизированном комплексе был разработан и спроектирован модуль измерения коэффициентов транзистора (МИКТ), который обеспечивает диапазон измерения коэффициента усиления базового тока транзистора h_{21} в диапазоне от 0 до 250. На текущий момент в состав автоматизированного комплекса, подготовленного для экспериментов по измерению флюенса быстрых нейтронов, входят пять измерительных каналов, каждый из которых состоит из детектора нейтронов, модуля МИКТ, термопары, установленной рядом с детектором. В состав АК входит также многоканальный аналоговый модуль I-7018Z для измерения температуры. Работой каналов управляет вычислительное устройство верхнего уровня – персональный компьютер. Структурная схема автоматизированного комплекса приведена на рис. 4.

В качестве детекторов используются биполярные кремниевые транзисторы $n-p-n$ типа (например, КТ316, КТ312, КТ301). Они подключаются к модулям МИКТ при помощи трехпроводных экранированных линий связи, которые обеспечивают их дистанционное подключение и повышают помехозащищенность АК. Режимы работы транзистора: $U_{\text{КЭ}} = 5$ В; $I_{\text{Э}} = 4,8$ мА; $\Delta I_{\text{Э}} = 0,4$ мА. Транзистор может работать как в пассивном (подача питания $U_{\text{КЭ}}$ производится только перед текущим измерением коэффициента усиления базового тока), так и в активном режиме (подача питания $U_{\text{КЭ}}$ производится постоянно).

Одной из целей разработки является подбор современной базы кремниевых транзисторов, которые могут использоваться в качестве детекторов для измерения флюенса нейтронов. Проблема заключается в том, что многие транзисторы, при помощи которых ранее проводились исследования по измерению флюенса, сняты с серийного производства.

Термопары и модуль I-7018Z (многоканальный модуль аналогового ввода сигналов с термопар фирмы ICP DAS) используются для измерения значений температуры в местах установки детекторов. На основе результатов измерений определяется влияние температуры на систематическую погрешность и вносится коррекция в полученные значения флюенса нейтронов.

Для управления работой АК разработан программный комплекс “АСИ ЭФИР”. Программа предназначена для автоматизированного измерения эффективного флюенса нейтронов в реальном временном масштабе при помощи модулей МИКТ, опрашиваемых через последовательный интерфейс RS-232/RS-485, сохранения данных на диск и их визуализации. Полученные данные отображаются в виде графика величины $1/(1 + h_{21})$ по времени. Программа осуществляет периодическое сохранение данных во внешний файл (по умолчанию, каждые 5 с). Возможно выделение интервала времени на графике (при помощи кнопок “Начало” и “Конец”) и сохранение попавших в этот интервал данных в отдельный файл. Программа позволяет устанавливать время между последовательными измерениями коэффициента h_{21} от 0.5 с до нескольких десятков секунд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оба разработанные во ВНИИЭФ автоматизированные комплексы для определения флюенса нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ в реальном временном масштабе изготовлены и апробированы на исследовательских ядерных реакторах БР-К1 и БР-1М [8].

Первый комплекс, основанный на методе регистрации плотности потока нейтронов с последующим расчетом значений флюенса нейтронов, показал высокую точность определения флюенса нейтронов и высокую достоверность получаемых результатов. В настоящее время автотестирование проводится работы по аттестации комплекса как средства измерения. Исследовательские работы с использованием второго комплекса будут продолжены.

Каждый из комплексов будет использован на исследовательских ядерных установках в зависимости от решаемых на них задач. Они могут применяться не только при испытаниях на радиационную стойкость, но при проведении других научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., Тихонов Е.Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.
2. Довбыш Л.Е., Кошелев А.С., Овчинников М.А. и др. // ВАНТ. Сер. Физ. ядерн. реакт. 2014. № 3. С. 83.
3. Овчинников М.А., Юхневич В.А., Довбыш Л.Е. и др. Устройство для определения нейтронных характеристик полей исследовательских ядерных установок. Пат. РФ № 2650810, кл. G01T3/00. 2017.
4. Пикулина Г.Н., Овчинников М.А., Кошелев А.С. и др. // Атомн. энергия. 2018. Т. 125. № 1. С. 30.
5. Пикулина Г.Н., Кошелев А.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610985, 2019.
6. Кошелев А.С., Овчинников М.А., Пикулина Г.Н. // ВАНТ. Сер. физ. Ядерн. реакт. 2012. № 3. С. 51.
7. Бегунов А.П., Горюшкин С.И., Маслов Г.Н. и др. // ВАНТ. Сер. Импл. реакт. и простые крит. сборки. 1987. № 1. С. 53.
8. Колесов В.Ф., Кувшинов М.И., Воронцов С.В. и др. // в кн.: 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии. Вып. 1. Саров: ФГУП “РФЯЦ – ВНИИЭФ”, 2011. С. 136.