

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ СВЕТОДИОДОВ К ОБЛУЧЕНИЮ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА РЕАКТОРЕ ИРТ-Т

© 2021 г. А. В. Градобоев^{a,b}, Е. А. Бондаренко^{a,*},
В. А. Варлачев^a, Е. Г. Емец^a, В. В. Седнев^b

^a Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

^b АО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов»
Россия, 634034, Томск, ул. Красноармейская, 99а

*e-mail: eab17@tpu.ru

Поступила в редакцию 27.01.2021 г.

После доработки 12.02.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Описана методика исследования стойкости светодиодов и.к.-диапазона длин волн к воздействию быстрых нейтронов на реакторе ИРТ-Т. Для горизонтального экспериментального канала ГЭК-6 реактора ИРТ-Т разработан фильтр, поглощающий тепловые нейтроны, на основе карбида бора и кадмия. Показана идентичность деградационных процессов в светодиодах при воздействии быстрых нейтронов с импульсным (реактор БАРС-4) и непрерывным (ГЭК-6 реактора ИРТ-Т) флюенсом. Разработанная методика может быть рекомендована для исследования стойкости различных материалов и изделий электронной техники к воздействию быстрых нейтронов в различных режимах облучения.

DOI: 10.31857/S0032816221040066

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающий спрос на изделия электронной техники (и.э.т.) с повышенной радиационной стойкостью приводит к необходимости создания новых экспериментальных установок для исследования этого параметра. В настоящее время для исследования стойкости и.э.т. к воздействию быстрых нейтронов используют установки, как, например, реактор БАРС-4 [1–3]. Следует отметить, что исследования на реакторе БАРС-4 достаточно дорогие и длительные по времени, поскольку необходимо проводить воздействия в диапазоне нескольких порядков флюенсов быстрых нейтронов.

Вместе с тем исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т имеет большой набор технических средств для решения научно-технических задач по развитию имеющихся и созданию новых установок в сфере радиационных и ядерных технологий. Реактор оборудован горизонтальными и вертикальными экспериментальными каналами, и при работе на мощности 6 МВт максимальная плотность потока тепловых нейтронов составляет $1.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а быстрых — $2.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [4].

Таким образом, исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т обладает большим потенциалом

для проведения и развития исследований в области создания пучков выведенных нейтронов с требуемыми энергетическими спектрами с целью изучения радиационной стойкости различных материалов, отработки методик физических измерений и калибровки детекторов нейтронов.

Целью данной работы является разработка методики исследования стойкости и.э.т. к воздействию быстрых нейтронов на исследовательском реакторе ИРТ-Т. Проведение исследований радиационной стойкости различных материалов и изделий на ИРТ-Т позволит существенно снизить стоимость и сократить время исследований.

Реакторы БАРС-4 и ИРТ-Т существенно отличаются энергетическими спектрами нейтронов: спектр ИРТ-Т содержит большое количество тепловых нейтронов. Поэтому для достижения поставленной цели необходимо разработать фильтр, эффективно поглощающий тепловые нейтроны, после чего сравнить полученные на ИРТ-Т с использованием этого фильтра результаты с данными исследования радиационной стойкости и.э.т. на реакторе БАРС-4.

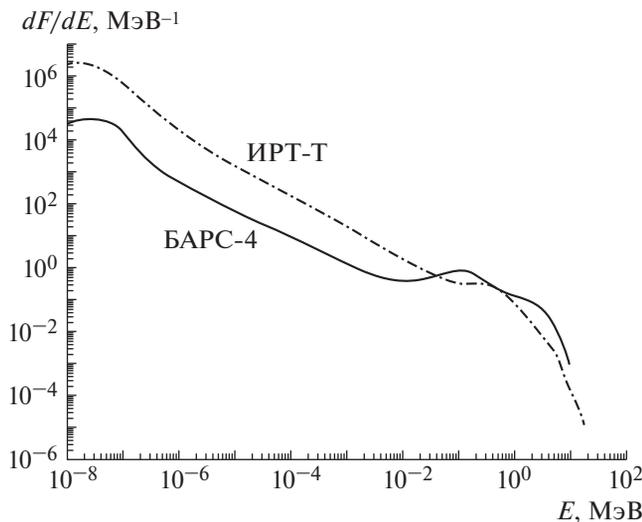


Рис. 1. Спектры нейтронов реактора БАРС-4 и реактора ИРТ-Т в канале ГЭК-6 после разработанного фильтра.

ФИЛЬТР ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

На базе горизонтального экспериментального канала ГЭК-6 реактора ИРТ-Т был разработан фильтр на основе карбида бора и кадмия [5]. Расчет параметров фильтра выполнен с использованием пакета программ MSU-PTR [6]. Путем варьирования геометрических размеров были определены наиболее оптимальные параметры фильтра, при которых спектр нейтронов после фильтра наиболее близок к спектру реактора БАРС-4. На рис. 1 приведены в сравнении спектры нейтронов реактора БАРС-4 и реактора ИРТ-Т в канале ГЭК-6 после разработанного фильтра.

Согласно рис. 1, модифицированный нейтронный спектр канала ГЭК-6 реактора ИРТ-Т после разработанного фильтра имеет схожие параметры со спектром реактора БАРС-4. Это подтверждают, в частности, значения средних энергий спектров: для ГЭК-6 реактора ИРТ-Т она равна 1.288 МэВ, а для БАРС-4 – 1.215 МэВ.

Таким образом, использование фильтра для поглощения тепловых нейтронов в канале ГЭК-6 реактора ИРТ-Т позволило создать установку для проведения исследования стойкости и.э.т. к воздействию быстрых нейтронов с непрерывным флюенсом.

Установка содержит металлическую штангу для закрепления исследуемых объектов. Электродвигатель дистанционно загружает штангу с образцом в экспериментальный канал реактора диаметром 100 мм, что позволяет помещать облучаемый образец в выведенный после фильтра пучок нейтронов на необходимом расстоянии от активной зоны реактора. При этом изменением расстояния между объектом исследования и выведенным по-

сле фильтра пучком быстрых нейтронов можно менять плотность потока последних. Имеется возможность проведения исследований как в пассивном (без наложения внешних электрических полей), так и в активном режиме питания с проведением контроля изменения параметров и.э.т. в процессе воздействия. Также осуществляется контроль температуры облучения. Флюенс быстрых нейтронов контролируется по расстоянию от объекта облучения до фильтра и по времени облучения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Для оценки эффективности разработанной установки были выполнены сравнительные исследования радиационной стойкости промышленных светодиодов (с.д.) инфракрасного (и.к.) диапазона длин волн, изготовленных на основе гетероструктур AlGaAs. Гетероструктуры были получены методом жидкофазной эпитаксии. При изготовлении с.д. были использованы стандартные методы создания омических контактов, фотолитографии и разделения пластин на отдельные кристаллы (чипы). Полученные таким образом кристаллы монтировали в корпус из оптического компаунда, который содержал линзу для создания узконаправленного потока излучения. Светодиоды излучали в диапазоне длин волн 750–900 нм. По результатам предварительных исследований было установлено, что используемый оптический компаунд не вносит вклада в поглощение света во всем диапазоне используемых флюенсов быстрых нейтронов. Рекомендуемый рабочий ток для данных с.д. $I_{op} = 50$ мА.

Произвольным образом были сформированы две партии с.д., по 30 штук каждая. Партия № 1 с.д. была предназначена для исследования радиационной стойкости на реакторе БАРС-4, а партия № 2 – для исследований на реакторе ИРТ-Т.

В процессе исследований для каждого с.д. измеряли прямую ветвь вольт-амперной характеристики (в.а.х.) и ватт-амперную характеристику (вт.а.х.) в фотометрическом шаре с использованием специального измерительного комплекса до и после облучения в непрерывном режиме питания.

Измерительный комплекс позволял измерять прямое напряжение с.д. от 0 до 5 В в диапазоне прямых токов 0–500 мА с шагом не менее 1 мА. При этом погрешность задания прямого тока от установленного уровня составляла $\pm 3\%$, а погрешность измерения мощности излучения с.д. – $\pm 5\%$. Полученные результаты измерений обрабатывались методами математической статистики. Каждую партию исследуемых с.д. характеризовали средними значениями измеряемых параметров.

Разброс мощности излучения в обеих партиях с.д. до облучения не превышал $\pm 10\%$, а после облучения возрастал до $\pm 15\%$. Отметим, что при графическом представлении полученных экспериментальных данных мы не приводим доверительные интервалы, а даем только средние значения измеряемых величин. Это сделано с целью уменьшения информационной нагрузки на представляемый графический материал.

При проведении исследований осуществлялся как последовательный набор флюенса быстрых нейтронов (для 20 штук с.д. в каждой партии), так и однократное облучение (10 штук в каждой партии с.д.). Сопоставление экспериментальных результатов, полученных таким образом, позволит сделать вывод о вкладе отжига радиационных дефектов в процессе измерения контролируемых характеристик с.д. в результате измерения в.а.х и вт.а.х с.д. Все измерения были выполнены в течение 24 ч после окончания облучения. Уровень воздействия быстрых нейтронов характеризовали флюенсом частиц F_n , нейтроны/см².

Во всех случаях облучение быстрыми нейтронами проводили в пассивном режиме питания, т.е. без пропуска рабочего тока, в нормальных климатических условиях. При этом электрические выводы с.д. были разомкнуты (обрыв), что позволило исключить разделение электронно-дырочных пар при облучении [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ СВЕТОДИОДОВ К ОБЛУЧЕНИЮ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Рассмотрим изменение в.а.х. и вт.а.х. при облучении с.д. быстрыми нейтронами. Прежде всего, следует отметить, что результаты исследований, полученные при последовательном наборе флюенса быстрых нейтронов, полностью согласуются с результатами, полученными при однократном облучении как для реактора БАРС-4, так и для реактора ИРТ-Т. Это позволяет полностью исключить проявление отжига вводимых радиационных дефектов в процессе измерений контролируемых характеристик с.д., а также в процессе их хранения при последовательном наборе требуемого флюенса быстрых нейтронов.

Рассмотрим изменение в.а.х. при облучении. На рис. 2 представлены типичные прямые ветви в.а.х. светодиодов до облучения при минимальном и максимальном напряжении питания и максимальном рабочем токе. Из рис. 2 следует, что исходные с.д. отличаются величиной сопротивления омических контактов [8]. Кроме того, согласно рис. 2, на в.а.х. можно выделить области низких (*LC*) и высоких (*HC*) токов. При этом гра-

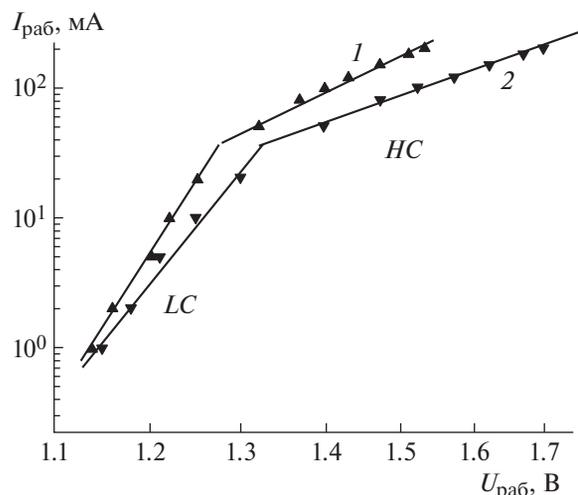


Рис. 2. Типичная прямая ветвь в.а.х. с.д. до облучения для минимального (1) и максимального (2) напряжений питания при рабочем токе $I_{\text{op}} = 200$ мА. *LC* – область низких токов, *BT* – область высоких токов.

ница перехода *LC*–*HC* практически идентична по значению рабочего тока.

В результате исследований установлено, что облучение быстрыми нейтронами во всем диапазоне исследуемых флюенсов для всех исследуемых партий с.д. не приводит к изменению в.а.х. Наблюдаемые в процессе исследований отклонения можно полностью объяснить погрешностью измерений. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что облучение быстрыми нейтронами не приводит к изменению электрофизических характеристик активного слоя с.д. и, следовательно, не изменяет свойств *p*–*n*-перехода с.д. В этом случае можно однозначно утверждать, что снижение мощности излучения с.д. при облучении быстрыми нейтронами будет обусловлено только изменением соотношения излучательная рекомбинация/безызлучательная рекомбинация.

Далее рассмотрим изменение вт.а.х. при облучении. На рис. 3 показано изменение вт.а.х. при облучении с.д. быстрыми нейтронами на реакторе БАРС-4. Идентичные результаты были получены и при облучении на реакторе ИРТ-Т.

На основании результатов исследования влияния облучения быстрыми нейтронами на вт.а.х. светодиодов можно сделать вывод, что наблюдаемое относительное снижение мощности излучения с.д. во всех рассматриваемых условиях облучения практически не зависит от величины рабочего тока. Об этом свидетельствует неизменность наклона вт.а.х. при различных уровнях облучения. Для того чтобы сопоставить результаты облучения на реакторах БАРС-4 и ИРТ-Т, рассмотрим относительное изменение мощности излучения с.д. при рабочем токе $I_{\text{раб}} = 50$ мА (рис. 4).

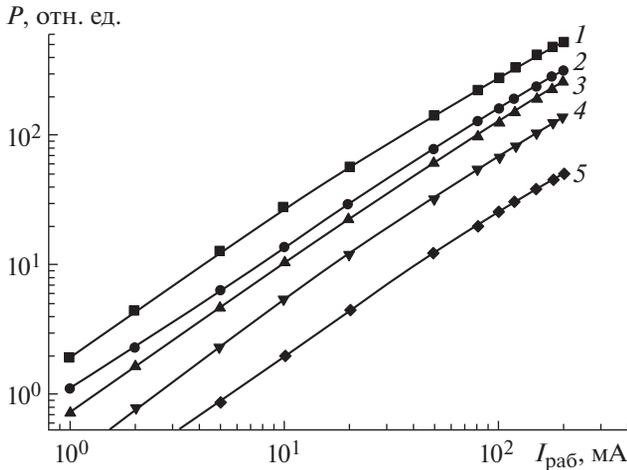


Рис. 3. Изменение вт.а.х. светодиодов в результате облучения на реакторе БАРС-4 при F_n , нейтроны/см²: 1 – 0; 2 – $1.74 \cdot 10^{12}$; 3 – $2.06 \cdot 10^{12}$; 4 – $4.24 \cdot 10^{12}$; 5 – $2.4 \cdot 10^{13}$.

Наблюдаемые различия экспериментальных данных можно полностью объяснить погрешностью измерения мощности излучения с.д. Таким образом, использование разработанной установки позволяет исследовать радиационную стойкость различных и.э.т. в достаточно широком диапазоне флюенсов быстрых нейтронов, при этом существенно сокращаются материальные и временные затраты на проведение исследований. Это позволяет сделать вывод, что существуют все предпосылки для развертывания на реакторе ИРТ-Т комплекса по проведению радиационных испытаний различных и.э.т.

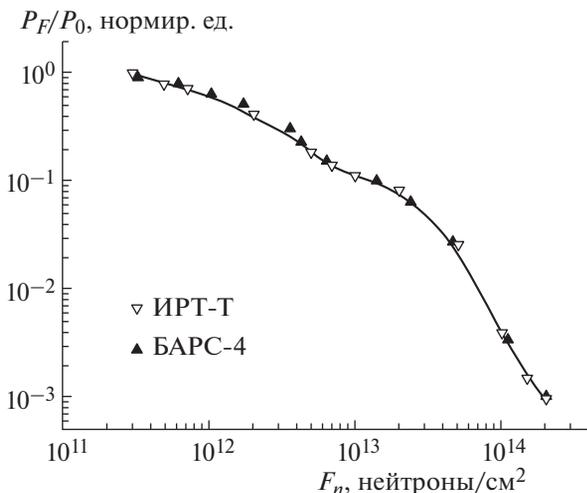


Рис. 4. Изменение мощности излучения с.д. ($I_{op} = 50$ мА) при облучении быстрыми нейтронами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные результаты, полученные в данной работе.

1. На основе горизонтального экспериментального канала ГЭК-6 реактора ИРТ-Т и разработанного фильтра для поглощения тепловых нейтронов создана установка для проведения исследований радиационной стойкости различных материалов и и.э.т. к облучению быстрыми нейтронами.

2. Представлена методика исследования стойкости светодиодов и к.-диапазона длин волн к воздействию быстрых нейтронов на реакторе ИРТ-Т.

3. Экспериментально доказана идентичность воздействия быстрых нейтронов на с.д. при облучении как на реакторе БАРС-4, так и на ИРТ-Т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anashin V.S., Ishutin I.O., Ulimov V.N. // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development – Proceedings. Moscow: IPPM RAS, 2010. P. 233–236.
2. Ненадышин Н.Н., Членов А.М. // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования: Труды межотраслевой научной конференции. Саров, 2015. Т. 1. С. 91–93.
3. The pulse solid-core dual-zone reactor on fast neutrons BARS-4. http://www.niipribovov.ru/model_ustanov.html.
4. Варлачев В.А., Солодовников Е.С., Дудкин Г.Н. // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 10/2. С. 304.
5. Бондаренко Е.А., Варлачев В.А., Градобоев А.В., Седнев В.В. // Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения: сборник научных трудов Международной научно-технической молодежной конференции. Томск, 2020. С. 18–20.
6. Шкаровский Д.А. Описание применения и инструкция для пользователей программ, собранных из модулей пакета MCU-5. М.: МИФИ, 2012. С. 11.
7. Gradoboev A.V., Sednev V.V. // Applied Mechanics and Materials. 2015. V. 770 P. 522. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.518>
8. Градобоев А.В., Симонова А.В., Орлова К.Н. // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 1–14. <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/8/text.pdf> DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.8>