

РАЗРАБОТКА МАКЕТА СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКЕТА НА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ, РАБОТАЮЩИХ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Авдеев Артем Дмитриевич (otd4@expd.vniief.ru), Мухин Сергей Николаевич, Шоров Владислав Юрьевич, Юхневич Виктор Александрович, Распопов Николай Владимирович, Пикулина Галина Николаевна, Костина Тамара Ильинична, Устюжанин Павел Викторович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В рамках работ по созданию системы динамического измерения флюенса нейтронов реакторного спектра в 2019 году в ИЯРФ был разработан и изготовлен макет аппаратуры измерения флюенса (МАИФ), предназначенный для проведения измерений на исследовательских ядерных установках (ИЯУ).

Целью работы является проведение исследований метрологических характеристик макетов системы динамического измерения эффективного флюенса нейтронов в условиях воздействия статического реакторного излучения, а также оценка влияния на показания измерительных систем температуры в месте размещения детекторов.

Проведены измерения параметров транзисторов-детекторов в схеме с общим эмиттером.

Получены экспериментальные зависимости коэффициента усиления h_{21} от флюенса нейтронов при статическом облучении в нейтронных полях ИЯУ.

Оценена возможность использования методики определения эффективных флюенсов нейтронов при радиационных испытаниях и исследованиях полупроводниковой аппаратуры и ее элементов для обработки данных, полученных с помощью МАИФ, и получения зависимости набора флюенса по времени статического воздействия.

Ключевые слова: РИД-Н, транзистор, коэффициент усиления, флюенс, ВИР-2М, статическое воздействие, коэффициент чувствительности транзистора, температурный эффект.

DEVELOPMENT OF A MODEL OF EFFECTIVE NEUTRON FLUENCE DYNAMIC MEASUREMENT AND RESEARCHES OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF A MODEL ON NUCLEAR REACTORS FUNCTIONING IN A STATIC MODE

Avdeev Artem Dmitrievich (otd4@expd.vniief.ru), Mukhin Sergey Nikolaevich, Shorov Vladislav Yurievich, Yukhnovich Victor Aleksandrovich, Raspopov Nikolay Vladimirovich, Pikulina Galina Nikolaevna, Kostina Tamara Ilinichna, Ustyuzhanin Pavel Victorovich

FSUE «RFNC – VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

Within the frames of creating a system aimed at dynamic measuring of neutron fluence of reactor spectrum there was developed and produced in NRRI in 2019 a breadboard of a fluence measuring unit (MAIF) to perform measurements on research nuclear reactors (IYaU).

The goal is to investigate metrological characteristics of the models of effective neutron fluence dynamic measurement under the effect of static reactor radiation as well as to estimate the effect of temperature on the measuring system readings at the sites of detectors arrangement.

There were measured parameters of transistors in a common-emitter circuit.

There were obtained experimental dependences of amplification factor h_{21} on neutron fluence under static effect.

There was estimated the possibility of using both the technique of effective neutron fluence determination during radiation tests and investigations of semiconductor equipment and its components, and the practical guide of 20.08.2008 State Registration №051-01/2564[1], to process the data obtained with the aid of MAIF and to get dependences of fluence accumulation basing on the static effect duration.

Key words: RID-N, transistor, amplification factor, fluence, VIR-2M, static effect, transistor sensitivity coefficient, temperature.

Введение

Основной задачей метрологического обеспечения радиационных испытаний элементов, узлов и систем радиоэлектронной аппаратуры является установление однозначного соответствия между показателями стойкости аппаратуры и параметрами воздействующих ионизирующих излучений (ИИ). При этом необходимо обеспечить интерпретацию результатов испытаний на моделирующих установках на предполагаемые условия реального воздействия.

Методика РИД-Н представляет собой отраслевой стандарт, разработанный в целях обеспечения единства дозиметрического контроля и сопровождения испытаний на радиационную стойкость полупроводниковой аппаратуры и ее элементов. Методика РИД-Н позволяет измерять эффективный флюенс на любых источниках нейтронного излучения.

Детектором в методике РИД-Н является кремниевый транзистор (детектор РИД-Н), предварительно проградуированный на эталонном источнике нейтронов. Методика РИД-Н обеспечивает без каких-либо предварительных спектральных измерений, контроль условий облучения и возможность сравнения результатов испытаний на различных источниках нейтронного излучения. Она может применяться в полях излучения с плотностью потока нейтронов до 10^{19} нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, диапазон эффективных флюенсов, измеряемых по методике, от 5×10^{12} до 1×10^{15} нэб/ см^2 . Где нэб – нейтрон эквивалентный реактору БАРС определен согласно[1]. Погрешность измерения эффективных флюенсов нейтронов не превышает $\pm 18\%$ при доверительной вероятности $P = 0,95$ [2].

На протяжении всего периода использования методика РИД-Н продемонстрировала надежность в применении и удобство в работе. Используемый в ней метод измерений можно считать общепризнанным, о чем свидетельствует тот факт, что почти в таком же виде (за исключением нейтронной метрики) он нашел свое воплощение и в стандартах США. Однако для проведения оперативных измерений в физических опытах, или когда детектор по каким-либо причинам нельзя извлечь после проведения эксперимента, необходим дистанционный вариант методики.

Аппаратно-программная модернизация макета аппаратуры измерения флюенса нейтронов

В рамках работ по созданию системы динамического измерения флюенса нейтронов реакторного спектра в 2019 году в ИЯРФ был разработан и изготовлен МАИФ, предназначенный для проведения измерений на ИЯУ.

МАИФ представляет собой кейт NI-PXI с набором измерительных плат на базе National Instruments. Макет обеспечивает работу транзистора-детектора в нужном режиме и измеряет коэффициент усиления транзисторов пересчитываются в эффективный флюенс нейтронов с помощью программного обеспечения.

Основой для аппаратной реализации макета послужило устройство для определения нейтронных характеристик полей ИЯУ, схемное решение, принцип функционирования которого оформлены в виде патента [3].

В 2019 году на ИЯУ – водяном импульсном реакторе ВИР-2М (ИЯУ ВИР-2М) был проведен ряд экспериментов по исследованию характеристик МАИФ в статическом и импульсном режимах работы ИЯУ.

На основе анализа полученных результатов в 2020 году были проведены аппаратно-программная модернизация модуля измерения коэффициентов транзистора (МИКТ) и модернизация управляющего программного обеспечения «Fluence».

Предлагаемый вариант МИКТ подразумевает проведение измерений по пяти независимым каналам (МИКТ1 – МИКТ5) модулей измерений коэффициента передачи (усиления) транзистора h_{21} в его активном режиме работы (при постоянно подаваемом на транзистор напряжении питания, рабочая точка транзистора: $U_{кз} = 5\text{В}$, $I_3 = 4,8\text{мА}$).

В случае пассивного облучения допустимо отсоединить разъемы подключаемых детекторов (транзисторов) от соответствующих разъемов измерительных модулей МИКТ, а после облучения, присоединив разъемы обратно, выполнить соответствующие измерения. Для устранения возможных ручных переключений проработан вариант модернизации принципиальной схемы модуля МИКТ путем ввода в ее состав электронного переключателя, обеспечи-

вающего отключение/подключение транзистора к цепям, задающим режим его работы.

Метод определения эффективного флюенса нейтронов

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, с целью определения эффективного флюенса нейтронов $\Phi_{\text{эф}}$, можно воспользоваться измерением коэффициента усиления транзистора h_{21} на низкой частоте в схеме с общим эмиттером. Обратная величина коэффициента усиления транзистора h_{21}^{-1} тоже линейно зависит от эффективного флюенса нейтронов $\Phi_{\text{эф}}$:

$$\Delta \left(\frac{1}{h_{21}} \right) = \frac{1}{h_{\Phi}} - \frac{1}{h_0} = K_h \Phi_{\text{эф}}, \quad (1)$$

где $\Delta \left(\frac{1}{h_{21}} \right)$ – обратная величина коэффициента усиления транзистора – h_{21}^{-1} ; h_0 и h_{Φ} – коэффициенты усиления транзистора в схеме с общим эмиттером до и после облучения, соответственно; $t_{\text{пр}}$ – время пролета неосновных носителей тока через базовую область, зависит, от типа транзисторов; K_h – коэффициент чувствительности транзистора к нейтронному излучению эталонного источника; $\Phi_{\text{эф}}$ – эффективный флюенс нейтронов; τ – время жизни неосновных носителей заряда в кремнии.

Преимущества использования транзисторов в качестве детекторов заключаются в том, что принципиальные схемы для измерения их параметров хорошо известны, причем требования к ним определены в государственных стандартах ГОСТ 18604.

Процедуру измерения эффективного флюенса с помощью транзисторов условно можно разбить на два этапа: градуировка транзисторов (измерение коэффициента чувствительности транзистора K_h) и проведение рабочих измерений (измерение эффективного флюенса нейтронов $\Phi_{\text{эф}}$).

Градуировка транзисторов – в процессе определяется их чувствительность к нейтронному излучению K_h на эталонном источнике. Для этого партию транзисторов, у которых предварительно измеряется коэффициент усиления, устанавливают в аттестованной области поля излучения и облучают флюенсом нейтронов $\Phi^{\text{Эт}}$, величину которого измеряют с помощью активационных детекторов. После облучения вновь измеряют коэффициент усиления транзисторов. Коэффициент чувствительности транзистора к нейтронному излучению эталонного источника согласно (2) определяется из выражения

$$K_h = \frac{\Delta \Gamma \left(\frac{1}{h_{21}} \right)}{\Phi^{\text{Эт}}} = \left(\frac{1}{h_{\Gamma}} - \frac{1}{h_0} \right) \frac{1}{\Phi_{\text{эф}}}, \quad (2)$$

где h_0 и h_{Γ} – коэффициенты усиления транзистора до и после градуировки, соответственно; $\Phi_{\text{эф}}$ – эффективный флюенс нейтронов; $\Phi^{\text{Эт}}$ – флюенс эталонного источника нейтронов (в методике РИД-Н за эталон взят реактор БАРС-5); $\Delta_{\Gamma} = ()$ – величина изменения обратного коэффициента усиления транзистора после градуировки

Величина флюенса нейтронов при градуировке выбирается такой, чтобы коэффициент усиления транзисторов после градуировки находился в диапазоне

$$0,5 \cdot h_0 \leq h_{\Gamma} \leq 0,7 \cdot h_0. \quad (3)$$

Транзисторы, у которых значение параметра h_{Γ} удовлетворяет условию (3), используются в качестве детекторов в методике РИД-Н.

Измерение эффективного флюенса нейтронов с помощью детекторов РИД-Н $\Phi_{\text{РИД-Н}}$ производится аналогичным образом.

При воздействии измеряемого эффективного флюенса нейтронов Φ_x коэффициент усиления транзистора h_{21} изменяется от значения h_{Γ}^* до h_x (h_{Γ}^* за счет термического отжига дефектов во время хранения детектора может быть немного больше h_{Γ}).

Как следует из (2), величину измеряемого эффективного флюенса нейтронов Φ_x следует определять по формуле из [1]:

$$\Phi_x = \frac{\Delta_x}{K_h} = \left(\frac{1}{h_x} - \frac{1}{h_{\Gamma}^*} \right) \frac{1}{K_h}, \quad (4)$$

где h_{Γ}^* и h_x – коэффициент усиления транзистора до и после градуировки, соответственно; K_h – коэффициент чувствительности транзистора к нейтронному излучению; $\Delta_x = ()$ – величина изменения обратного коэффициента усиления транзистора после облучения.

Для данного исследования за $\Phi^{\text{Эт}}$ принимается флюенс реактора ВИР-2М, определенный тремя способами:

- по показанию транзистора в соответствии с методикой РИД-Н;
- пересчетом активационного интеграла Ni-индикатора;
- пересчетом сигнала камеры нейтронной компенсированной (КНК-2-7) и камеры гамма компенсированная (КГК-2).

Работа МАИФ в статических пусках ИЯУ ВИР-2М

В 2020 году на ИЯУ ВИР-2М проводились исследования метрологических характеристик МАИФ при длительном воздействии реакторного излучения.

Исследования проводились в совместных пусках, т. е. дополнительно с объектом исследований, на облучательной позиции, размещался объект испытаний. Чувствительная часть МАИФ (транзисторы) устанавливались на позицию в полусферическом экспериментальном канале ИЯУ ВИР-2М (ПСК),

соответствующую определенному флюенсу (10^{12} – 10^{15}) нейтр./см².

Типовые схемы размещения транзисторов на облучательной позиции представлены на рис. 1: рис. 1,а – на кольцевом стенде, рис. 1,б – на конверторном стенде.

Также в качестве мониторов ионизирующего излучения (ИИ) были задействованы камеры КГК-2 и КНК-2-7

Для контроля температуры среды (воздух) в месте размещения транзисторов использовалось устройство измерительное многофункциональное интеллектуальное (УИМИ) с термопарой типа К.

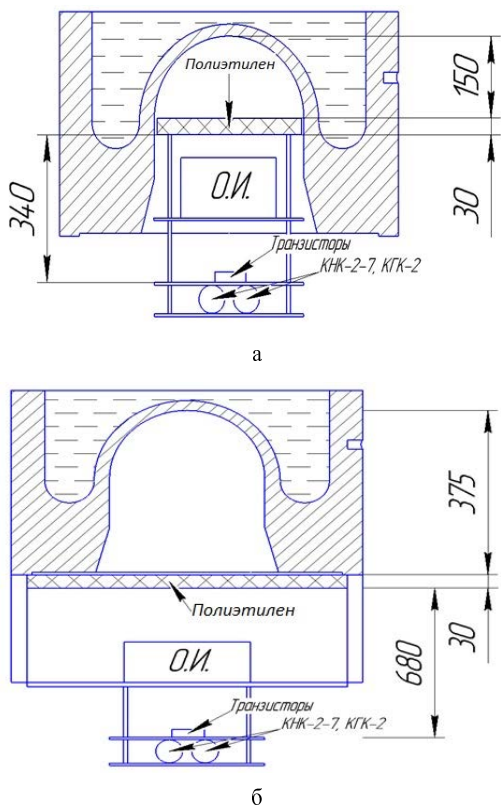


Рис. 1. Типовое расположение чувствительной части МАИФ и камер-мониторов КГК-2 и КНК-2-7: а – на кольцевом стенде, б – на конверторном стенде

Калибровочный пуск

Чувствительная часть МАИФ – транзисторы совместно с термопарой устанавливались на уровне 455 мм от полюса ПСК ИЯУ ВИР-2М. Были установлены детекторы сопровождения (Ni-индикатор – 2 шт, набор транзисторов РИД-Н – 3 шт. и камеры КНК и КГК) для определения флюенсов Φ_{Ni} , $\Phi_{РИД-Н}$ и $\Phi_{КНК}$ и КГК в месте установки чувствительной части МАИФ.

ИЯУ ВИР-2М была выведена на мощность $P \sim 1,8$ кВт, измерения коэффициентов усиления транзисторов проводились непрерывно по времени. Общее время работы установки на мощности составило ~ 49 часов

В качестве измерителя параметров транзисторов использовался МАИФ, обеспечивающий дистанционное измерение коэффициентов передачи (усиления) h_{21} и обратного коэффициента усиления h_{21}^{-1} биполярных транзисторов в схеме с общим эмиттером по пяти независимым каналам МИКТ 1 – МИКТ 5 (Ch1-Ch5, рис. 2, 3). Для измерения коэффициента h_{21} исследуемого транзистора выполнялось измерение приращения базового тока транзистора при следующих параметрах режима его работы: $U_{кз} = 5$ В, $I_b = 4.8$ мА и $\Delta I_b = 0.4$ мА. По измеренному приращению тока базы производилось вычисление коэффициента h_{21} из соотношения (5):

$$\Delta I_b = \frac{\Delta I_c}{(1 + h_{21})} \quad (5)$$

Полученные за время эксперимента значения h_{21} и h_{21}^{-1} (см. рис. 2, 3) показывают, что зависимости $h_{21}^{-1}(t)$ при воздействии ИИ для исследуемых транзисторов хорошо аппроксимируются линейной функцией.

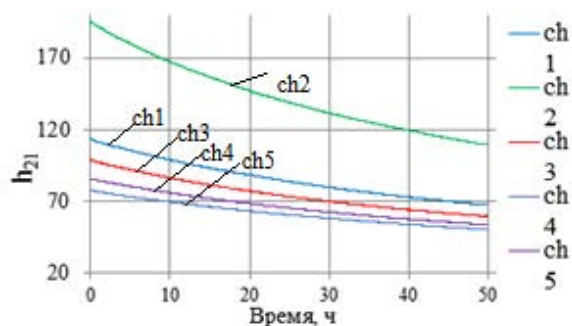


Рис. 2. Зависимости коэффициентов усиления транзисторов под воздействием ИИ ИЯУ ВИР-2М от времени

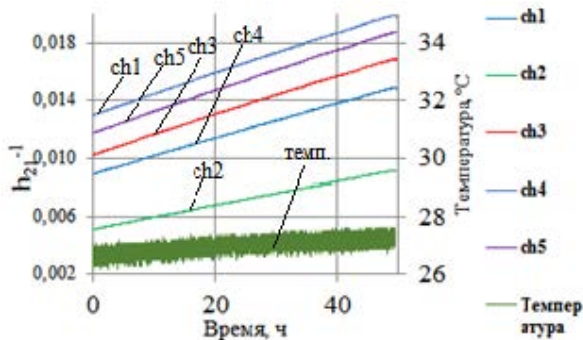


Рис. 3. Зависимости обратных коэффициентов усиления транзисторов и температуры от времени

Обработка результатов

В соответствии с методикой [1] эффективный флюенс нейтронов $\Phi_{эф}$ определяется по формуле:

$$\Phi_{эф} = \Phi_{\Gamma} \frac{\Delta X}{\Delta \Gamma} \Phi, \quad (6)$$

Коэффициенты усиления и коэффициенты чувствительности транзисторов

Канал	Δh_{21}	$K_{h_{21}(\text{РИД-Н})}$	$K_{h_{21}(\text{Ni})}$	$K_{h_{21}(\text{КНК и КГК})}$
МИКТ 1 (Ch1)	0,006004	$3,16\text{E}^{15}$	$2,78\text{E}^{15}$	$2,56\text{E}^{15}$
МИКТ 2 (Ch2)	0,003982	$4,77\text{E}^{15}$	$4,19\text{E}^{15}$	$3,87\text{E}^{15}$
МИКТ 3 (Ch3)	0,006683	$2,84\text{E}^{15}$	$2,50\text{E}^{15}$	$2,30\text{E}^{15}$
МИКТ 4 (Ch4)	0,006995	$2,72\text{E}^{15}$	$2,39\text{E}^{15}$	$2,20\text{E}^{15}$
МИКТ 5 (Ch5)	0,007002	$2,71\text{E}^{15}$	$3,39\text{E}^{15}$	$2,20\text{E}^{15}$

где Φ_{Γ} – градуировочный флюенс нейтронов, ; ΔX – величина изменения обратного коэффициента усиления транзистора после облучения; $\Delta\Gamma$ – величина изменения обратного коэффициента усиления транзистора после градуировки. F – коэффициент относительной эффективности источника нейтронов, используемого при градуировке вместо эталонного БАРС-5;

$$\Delta X = \frac{1}{h_X} - \frac{1}{h'_T} = h_X^{-1} - h_T'^{-1}; \quad (7)$$

$$\Delta\Gamma = \frac{1}{h_{\Gamma}} - \frac{1}{h_0} = h_{\Gamma}^{-1} - h_0^{-1}, \quad (7)$$

h_X – коэффициент усиления транзистора h_{21} после прекращения воздействия ИИ; h'_T – контрольный коэффициент усиления транзистора h_{21} перед началом воздействия ИИ; h_T – коэффициент усиления транзистора h_{21} после проведения градуировочного флюенса; h_0 – коэффициент усиления транзистора h_{21} перед проведением градуировочного импульса.

Параметры Φ_{Γ} , h_0 и h_T и соответственно параметр $\Delta\Gamma$ исследовались в статических пусках. За параметр h_0 принималась первая величина h_{21} измеренная МАИФ в отсутствии воздействия ИИ на чувствительную часть макета. Для построения кривой набора флюенса, МАИФ с определённой периодичностью измерялся параметр h_{21} , принимаемый нами за коэффициент h_T .

Значение Φ_{Γ} получались пересчетом значений показаний транзисторов: в методике РИД-Н, пересчетом активационного интеграла Ni-индикатора и пересчетом сигнала с камер КНК и КГК, данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения градуировочных флюенсов нейтронов, полученные различными способами пересчета

Способ пересчета	Φ_{Γ} , ($\Phi_{ЭТ}$),
Ni	$6,38\text{E}^{13}$
РИД-Н	$4,70\text{E}^{13}$
КНК и КГК	$4,12\text{E}^{13}$

Далее, зная значение Φ_{Γ} ($\Phi_{ЭТ}$) и значение $\Delta h_{21}(\Delta\Gamma)$, можно найти коэффициент чувствительности транзистора к нейтронному излучению K_h , используя формулу (4).

Конечные значения коэффициентов усиления и коэффициентов чувствительности транзисторов для каждого канала МАИФ (МИКТ 1- МИКТ 5), полученные разными методами представлены в табл. 2.

Полученные значения параметров для каждого из каналов измерения позволяют определить флюенс нейтронов в последующем пуске ИЯУ ВИР-2М.

Экспериментальные исследования

ИЯУ ВИР-2М была выведена на мощность $P \sim 2,2\text{кВт}$, измерения коэффициентов усиления транзисторов проводились непрерывно по времени. Общее время работы установки на мощности составило ~ 48 часов.

На рис. 4, 5 представлены результаты измерений h_{21} и h_{21}^{-1} во время работы ИЯУ ВИР-2М на мощности. Измерения проводились с помощью МАИФ по пяти независимым каналам МИКТ 1 – МИКТ 5 (Ch1-Ch5, рис. 4, 5). Также приведены показания, полученные с камер КГК-2 и КНК 2-7 (см. рис. 6). Графики набора флюенса, пересчитанные тремя способами, представлены на рис. 7–9.

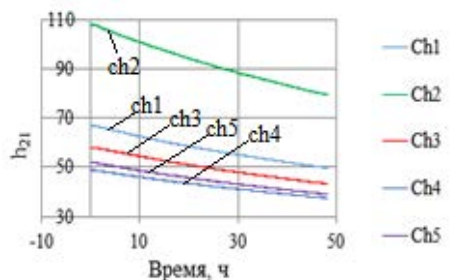


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления транзистора от времени: Ch1-Ch5 – каналы измерения

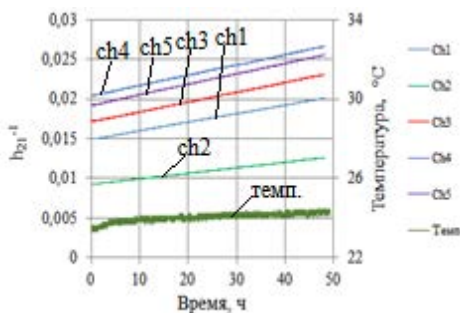


Рис. 5. Зависимость обратного коэффициента усиления транзистора и температуры от времени: Ch1-Ch5 – каналы измерения

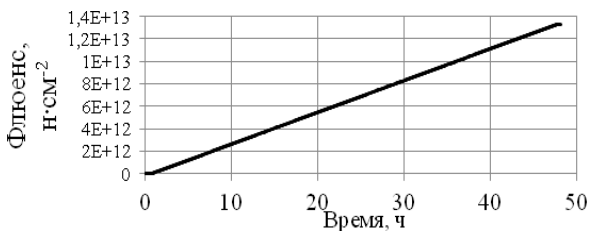


Рис. 6. Флюенс, полученный пересчетом сигнала с КНК и КГК

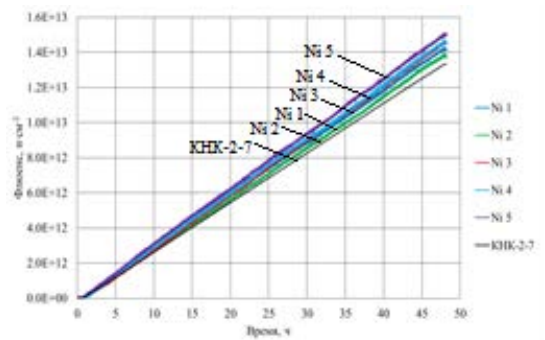


Рис. 8. Графики: № 1–5 – набора флюенса, пересчитанного через коэффициент чувствительности транзисторов $K_{b21(Ni)}$; КНК-2-7 – флюенса, пересчитанного по сигналу КНК и КГК, по времени статического воздействия

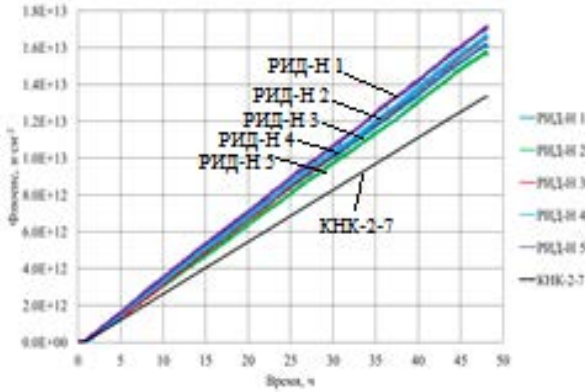


Рис. 7. Графики: РИД-Н 1 – РИД-Н 5 – набора флюенса, пересчитанного через коэффициент чувствительности транзисторов $K_{b21(РИД-Н)}$; КНК-2-7 – флюенса, пересчитанного по сигналу КНК и КГК, по времени статического воздействия

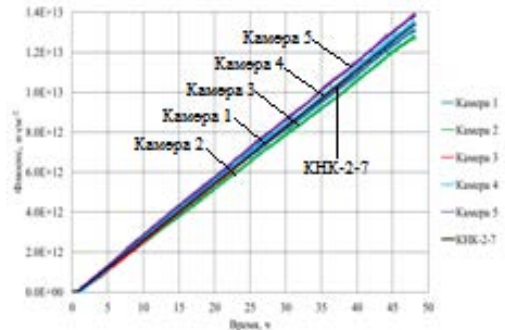


Рис. 9. Графики: Камера 1–5 – набора флюенса, пересчитанного через коэффициент чувствительности транзисторов $K_{b21(КНК \text{ и } КГК)}$; КНК-2-7 – флюенса, пересчитанного по сигналу камер КНК и КГК, по времени статического воздействия

В табл. 3, 4 приведены сводные данные по пуску.

Таблица 3

Параметры флюенса, полученного тремя способами пересчета для каждого канала МАИФ, показания транзисторов (в методике РИД-Н, Ni-индикаторов, КНК и КГК) и величина невязки

Флюэнс, нейтр./см ²	Канал					Флюэнс, нейтр./см ²		Невязка, %
	МИКТ1	МИКТ2	МИКТ3	МИКТ4	МИКТ5	$\Phi_{\text{среднее}}$	$\Phi_{\text{детекторов}}$	
$\Phi_{\text{РИД-Н}}$	1,62E ¹³	1,57E ¹³	1,66E ¹³	1,66E ¹³	1,71E ¹³	1,64E ¹³	1,57E ¹³	4,45
Φ_{Ni}	1,42E ¹³	1,38E ¹³	1,46E ¹³	1,46E ¹³	1,50E ¹³	1,44E ¹³	1,28E ¹³	12,84
$\Phi_{\text{КНК и КГК}}$	1,31E ¹³	1,27E ¹³	1,34E ¹³	1,35E ¹³	1,38E ¹³	1,33E ¹³	1,33E ¹³	0,14

Φ_{Ni} – значение флюенса, полученное пересчетом активационного интеграла Ni-индикатора, $\Phi_{\text{РИД-Н}}$ – значение флюенса, полученное пересчетом показаний детектора в методике РИД-Н), $\Phi_{\text{КНК и КГК}}$ – значение флюенса, полученное пересчетом сигнала камер КНК и КГК.

Таблица 4

Сравнение флюенсов, полученных тремя способами пересчета, с флюенсом, полученным в методике РИД-Н и величина невязки

Способ пересчета	$\Phi_{\text{среднее, нейтр./см}^2}$	$\Phi_{\text{РИД-Н, нейтр./см}^2}$	Невязка, %
РИД-Н	1,64E ¹³	1,57E ¹³	4,45
Ni	1,44E ¹³		8,28
КНК и КГК	1,33E ¹³		15,28

Результаты экспериментов на ИЯУ ВИР-2М

В результате всех статических пусков на ИЯУ ВИР-2М было замечено, что при использовании коэффициента чувствительности транзистора ($K_{h_{21}}$ (РИД-Н)), рассчитанного через показания детектора в методике РИД-Н, для расчета набора флюенса по времени статического пуска имеет наибольшую сходимость (<12 %) с показаниями детекторов сопровождения. Также следует отметить линейный характер набора флюенса, полученного пересчетом сигнала КГК и КНК.

Оценка температурного влияния на параметры транзисторов

Для оценки влияния температуры на параметры транзисторов без воздействия реакторного излучения в диапазоне от 15 до 90 °С были проведены измерения коэффициента усиления транзистора (h_{21}) и температуры (T) измерительного оборудования в камере тепла и холода ESPEC и построена зависимость $h_{21}(T)$.

В состав измерительного оборудования вошли: МАИФ, кабельные линии связи (КЛС) – кабель Belden M 9389 E34972 Shielded (UL) 3м, набор из 15 транзисторов 2Т301Ж, КТ312В, 2Т316Д по 5 транзисторов каждого типа, термопара типа. Для контроля температуры в месте размещения транзисторов использовалось УИМИ.

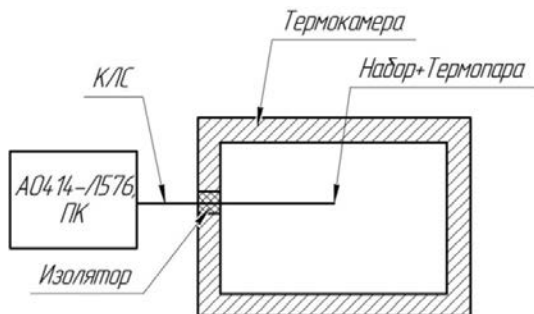


Рис. 10. Условная схема экспериментов при работе с камерой ESPEC MC-811P

После размещения набора, состоявшего из транзисторов одного типа и термопары, внутри камеры тепла и холода ESPEC MC-811P включался макет аппаратуры измерения флюенса и фиксировались величины коэффициента усиления каждого транзистора h_{21} до начала нагрева в камере. Далее проводилась серия нагревов и остываний воздушного пространства в пределах от 15 до 90 °С внутри камеры ESPEC MC-811P, внутри которой находились наборы с транзисторами. Вышеописанная операция повторялась для каждого типа транзисторов.

На рис. 11–13 представлены зависимости коэффициента усиления транзистора от температуры $h_{21}(T)$ при проведении экспериментов с транзисторами 2Т301Ж, КТ312В, 2Т316Д в камере ESPEC MC-811P (значения h_{21} для 5 транзисторов каждого типа обозначены как Ch1-Ch5).

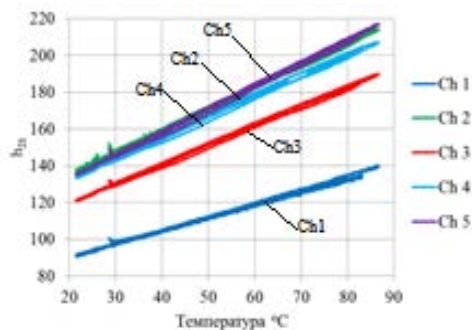


Рис. 11. Зависимость коэффициента усиления транзистора от температуры $h_{21}(T)$ для 5-ти транзисторов типа 2Т301Ж

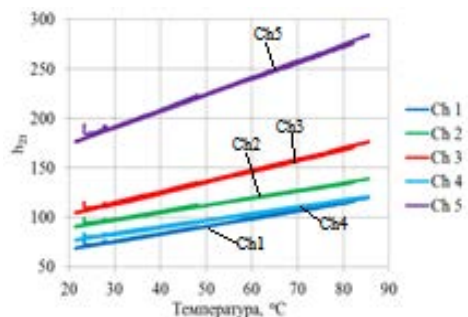


Рис. 12. Зависимость коэффициента усиления транзистора от температуры $h_{21}(T)$ для 5-ти транзисторов типа КТ312В

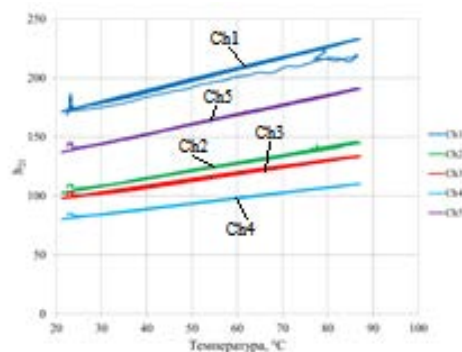


Рис. 13. Зависимость коэффициента усиления транзистора от температуры $h_{21}(T)$ для 5-ти транзисторов типа 2Т316Д

Из рис. 11-13 видно, что зависимость $h_{21}(T)$ для всех типов транзисторов визуально близка к линейной зависимости. С помощью функции, встроенной в программу Excel, были построены линии тренда каждого транзистора во всех трех наборах.

Было отмечено, что для уравнений прямых, описывающих зависимости $h_{21}(T)$ транзисторов (2Т301Ж, КТ312В, 2Т316Д), после деления на коэффициент усиления транзистора h_{21} (начальное значение до нагрева), получают общие для каждого набора транзисторов закономерности, которые отражены в эмпирических формулах:

1) для набора с транзисторами 2Т301Ж:

$$h_{21}(T) = h_{21,0} \cdot (0.0088 \cdot T + 0.812);$$

2) для набора с транзисторами КТЗ12В: $h_{21}(T) = h_{н.у.}(0,0099 \times T + 0,792)$;

3) для набора с транзисторами 2ТЗ16Д: $h_{21}(T) = h_{н.у.}(0,0050 \times T + 0,903)$,

где $h_{н.у.}$ – коэффициент усиления транзистора до начала температурного воздействия, T – температура, °С.

Величины отклонений значений, полученных с помощью эмпирических формул, от измеренных (во всем температурном диапазоне): для транзистора 2ТЗ01Ж – не более 5.7 %, для транзистора КТЗ12В – не более 8.6 %, для транзистора 2ТЗ16Д – не более 7.9 %.

Результаты температурных испытаний транзисторов

Результаты температурных испытаний транзисторов показали, что воздействие температуры на транзисторы существенно влияет на величину коэффициента усиления транзистора (при температуре воздушной среды равной, 86 °С, изменения могут составлять до 80 %). При разработке макета системы динамического измерения эффективного флюенса нейтронов, для компенсации изменения значений $h_{21}(T)$, которые могут возникать в месте размещения транзисторов во время измерений, необходимо предусмотреть способ внесения поправок с учетом данных, полученных выше.

В работах, проведенных на установке ВИР-2М, нагрев воздушной среды, в которой размещались транзисторы, осуществлялся до температур в диапазоне 20–40 °С, при этом разность температур начала и конца экспериментов составляла 1–5 °С.

Введение поправок по температуре, для корректировки h_{21} в диапазоне $T = 20 - 40$ °С, полученных по эмпирическим зависимостям в данной работе, не требуется, так как отклонения значений h_{21} , посчитанные по эмпирическим зависимостям, равны или превышают отклонения измеренных h_{21} при нагреве от значений h_{21} при начальных условиях. Отклонения значений h_{21} в диапазоне 20–40 °С, посчитанные по эмпирическим зависимостям от значений h_{21} при начальных условиях составили для транзисторов 2ТЗ01Ж – 4.03 %, для транзисторов КТЗ12В – 8.57 %, для транзисторов 2ТЗ16Д – 6.43 %.

Заключение

На МАИФ при статическом воздействии (в диапазоне от $5 \cdot 10^{11}$ до $1 \cdot 10^{15}$ н/см²) проведены измерения

коэффициента усиления транзисторов h_{21} в схемах с общим эмиттером.

В результате всех статических пусков на ИЯУ ВИР-2М было замечено, что невязка рассчитанного по методике РИД-Н флюенса и показаний детекторов сопровождения составляет не более 12 %.

Также следует отметить линейный характер набора флюенса, полученного пересчетом сигнала камер КГК и КНК. Эти наблюдения предполагается использовать для аттестации методики динамического измерения флюенса нейтронов реакторного спектра.

Для оценки влияния температуры на параметры транзисторов без воздействия реакторного излучения в диапазоне от 15 до 90 °С были проведены измерения зависимостей $h_{21}(T)$ в камере тепла и холода ESPEC MC-811P.

Было отмечено, что зависимости $h_{21}(T)$ транзисторов (2ТЗ01Ж, КТЗ12В, 2ТЗ16Д), можно описать эмпирическими формулами:

1) для набора с транзисторами 2ТЗ01Ж: $h_{21}(T) = h_{н.у.}(0,0088 \times T + 0,812)$;

2) для набора с транзисторами КТЗ12В: $h_{21}(T) = h_{н.у.}(0,0099 \times T + 0,792)$;

3) для набора с транзисторами 2ТЗ16Д: $h_{21}(T) = h_{н.у.}(0,0050 \times T + 0,903)$.

Величины отклонений значений, полученных с помощью эмпирических формул, от измеренных (во всем температурном диапазоне): для транзистора 2ТЗ01Ж – не более 5.7 %, для транзистора КТЗ12В – не более 8.6 %, для транзистора 2ТЗ16Д – не более 7.9 %.

Список литературы

1. Определение эффективных флюенсов нейтронов при радиационных испытаниях и исследованиях полупроводниковой аппаратуры и ее элементов. Методика. РИД-Н Гос. рег. №051-01/2564 от 20.08.2008.

2. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаботория знаний, 2012.

3. Патент 2650810, РФ, МПК ?. Устройство для определения нейтронных характеристик полей исследовательских ядерных установок / Овчинников М. А., Юхневич В. А., Довбыш Л. Е., Пикулина Г. Н., Голубева О. А. // Бюллетень изобретений. 2018. № 11.