

**Обработка методики применения мониторов структурных повреждений
для сопровождения облучательных экспериментов.
Testing methods of application monitors structural damage to accompany the irradiation
experiments
Бутин И. В.**

*Бутин Иван Валентинович / Butin Ivan Valentinovich - студент,
кафедра проектирования и технологии производства электронной аппаратуры,
факультет информатики и систем управления,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Лыткарино*

Аннотация: в статье представлено теоретическое обоснование возможности использования в качестве датчиков эффективного значения флюенса нейтронов биполярных транзисторов. Выполнены измерения исходных характеристик транзисторов, проведено их облучение на моделирующей установке БАРС-4 с эталонным спектром излучения. Получены калибровочные зависимости для дальнейшего использования этих транзисторов в качестве мониторов структурных повреждений при определении эффективности нейтронного излучения источников с отличающимся спектром излучения.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, ионизирующее излучение, монитор структурных повреждений, контрольно-измерительная аппаратура.

Введение

Радиоэлектронная аппаратура применяется в самых различных отраслях науки и техники, что обусловлено необходимостью передачи, преобразования, приёма и обработки больших объёмов информации и реализации сложных задач контроля и управления с помощью применения РЭА, определяется в значительной мере способностью безотказного функционирования в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов в течение всего периода эксплуатации. Обеспечение необходимых уровней стойкости и надёжности РЭА требует применения специальных схемотехнических, технологических и конструктивных решений на всех этапах её проектирования и изготовления. Поэтому одной из наиболее важных проблем радиационных испытаний является повышение степени достоверности оценки радиационной стойкости РЭА и ее составных частей.

Радиационная стойкость – это способность радиоэлектронной аппаратуры нормально функционировать в процессе и после воздействия проникающих ионизирующих излучений.

При проведении длительных экспериментов важно иметь оперативную информацию о достигнутых уровнях нагружения для принятия решения об инициализации аппаратуры и подтверждения ее работоспособности в условиях облучения.

Для полноценного анализа результатов исследований в опытах на источниках гамма-нейтронного излучения и сопоставления полученных результатов с другими результатами отработочных испытаний важно не только обеспечить регистрацию плотности потока нейтронов, но и иметь возможность оперативно оценить спектральный состав излучения и его эффективность.

Для оценки нейтронной стойкости РЭА и ее составных частей используют предельное значение флюенса нейтронов эталонного источника, при котором сохраняется работоспособность РЭА.

Флюенсом нейтронов называют отношение числа нейтронов dN , пересёкших перпендикулярную пучку элементарную площадку dS за данный промежуток времени, к площади этой площадки [1].

Методика применения мониторов структурных повреждений для оперативной дозиметрии

Для определения флюенса нейтронов, эквивалентного флюенсу эталонного источника, учитывающего спектральный состав излучения, разработана методика, адаптированная к условиям испытаний на исследовательских реакторах. В соответствии с этой методикой в качестве мониторов нейтронного излучения могут использоваться биполярные транзисторы, изменение коэффициента усиления которых связано аналитической зависимостью с флюенсом нейтронов [2, 3, 4]. При организации дистанционных измерений на один МСП требуется до трех линий связи.

При отработке аппаратуры в облучательных экспериментах существуют ограничения на общее число линий связи. В условиях этих ограничений при планировании экспериментов приходится делать выбор между глубиной контроля элементов и приборов аппаратуры и точностью определения радиационных нагрузок на критичных элементах и приборах.

В связи с этим сокращение числа линий связи МСП с КИА является актуальной задачей, позволяющей повысить информативность испытаний как в части детализации условий нагружения, так и в части объема контролируемых параметров аппаратуры автоматики.

Физические основы методики для определения уровней нагружения объектов испытаний

Основой экспериментально-расчетного метода определения эквивалентного флюенса нейтронов является эмпирически установленное соотношение, описывающее зависимость величины, обратной

коэффициенту усиления кремниевых биполярных транзисторов H_{21E} , от интегрального потока нейтронов Φ_n (соотношение Мессенджера-Спратта):

$$\frac{1}{H_{21E}(\Phi_n)} = \frac{1}{H_{21E}(0)} + K_H \cdot \Phi_n, \quad (1.1)$$

где K_H – константа радиационных повреждений МСП при заданном токе эмиттера.

Типы биполярных транзисторов, рекомендованные к использованию в качестве МСП, и ориентировочные диапазоны их применения по флюенсу нейтронов приведены в таблице 1. Конструктивно-технологические особенности данных транзисторов обеспечивают линейность зависимости (1.1) от флюенса нейтронов в диапазоне их значений не менее одного порядка.

При практическом использовании методики проводят предварительное облучение МСП на эталонном реакторе (обычно используются реакторы типа «БАРС»), после которого измеряют у облученных приборов коэффициент усиления H_{21E} или базовый ток I_b при заданном токе эмиттера (этап «калибровки»).

Далее проводят облучение МСП на реакторе с неизвестным спектром нейтронного излучения и измеряют параметры облученных приборов (этап «измерений»).

Таблица 1. БТ, используемые как мониторы структурных повреждений

МСП	Тип БТ	Диапазон измерения Φ_n , нейтр/см ²
№ 1	2Т201	$\sim 5 \cdot 10^{11} - 10^{13}$
№ 2	2Т312	$\sim 5 \cdot 10^{12} - 10^{14}$
№ 3	2Т316	$\sim 5 \cdot 10^{13} - 10^{15}$

В обоих случаях облучение МСП проводят в пассивном режиме, сводя до минимума временной интервал между измерениями и облучениями МСП.

Тип МСП выбирают с учетом предполагаемого уровня облучения изделия. Для каждого образца МСП рассчитывают значения $K_H \cdot \Phi_{n_эм}$ для этапа калибровки и $K_H \cdot \Phi_{n_у}$ для этапа измерений

$$K_H \cdot \Phi_{n_эм} = \frac{1}{H_{21E}(\Phi_{n_эм})} - \frac{1}{H_{21E}(0)},$$

$$K_H \cdot \Phi_{n_у} = \frac{1}{H_{21E}(\Phi_{n_у})} - \frac{1}{H_{21E}(\Phi_{n_эм})}.$$

Эквивалентный поток нейтронов $\Phi_{n_и}$ рассчитывают по формуле:

$$\Phi_{n_и} = \frac{\Phi_{n_эм} \cdot \left(\frac{1}{H_{21E}(\Phi_{n_у})} - \frac{1}{H_{21E}(\Phi_{n_эм})} \right)}{\frac{1}{H_{21E}(\Phi_{n_эм})} - \frac{1}{H_{21E}(0)}}, \text{ нэб/см}^2 \quad (1.2)$$

(нэб – «нейтрон, эквивалентный нейтрону эталонного реактора БАРС»).

Как правило, доступ к МСП после проведения облучений на реакторах обеспечивается через 1–2 суток, а иногда и через более продолжительный период – от нескольких недель до нескольких месяцев.

Для того, чтобы повысить информативность испытаний сложных объектов и обеспечить оперативность принятия решений в процессе проведения экспериментальных исследований, может быть применена несколько отличающаяся процедура использования МСП. Облучение МСП следует проводить в активном режиме и в процессе облучения дистанционно измерять параметры предварительно калиброванных МСП (см. рисунок 1.1).

При измерениях параметров МСП необходим источник тока, задающий некоторое заранее выбранное значение тока эмиттера $I_b = I_k + I_б$ и измеритель тока базы, по показаниям которого рассчитывается значение коэффициента H_{21E} МСП:

$$H_{21E} = \frac{I_k}{I_б}.$$

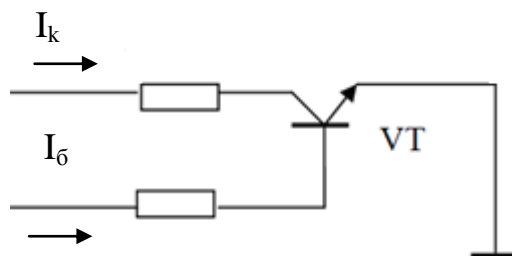


Рис. 1.1. Схема включения МСП в активном режиме измерений

Для каждого дополнительного МСП требуется как минимум две дополнительные измерительные линии.

Поскольку при планировании экспериментальных исследований приходится решать задачу оптимизации состава контрольно-измерительной аппаратуры, количества используемых МСП и измерительных линий в условиях каждого конкретного эксперимента для регистрации полей нагружения, необходимо сократить количество измерительных линий на каждый МСП. Для этого предлагается воспользоваться схемой включения МПС, приведенной на рисунке 1.2.

В этом случае при использовании нескольких МСП, размещаемых на объекте сложной формы, для каждого дополнительного МСП необходима только одна дополнительная линия связи.

Использование предлагаемой схемы включения МСП предполагает следующий алгоритм применения МСП.

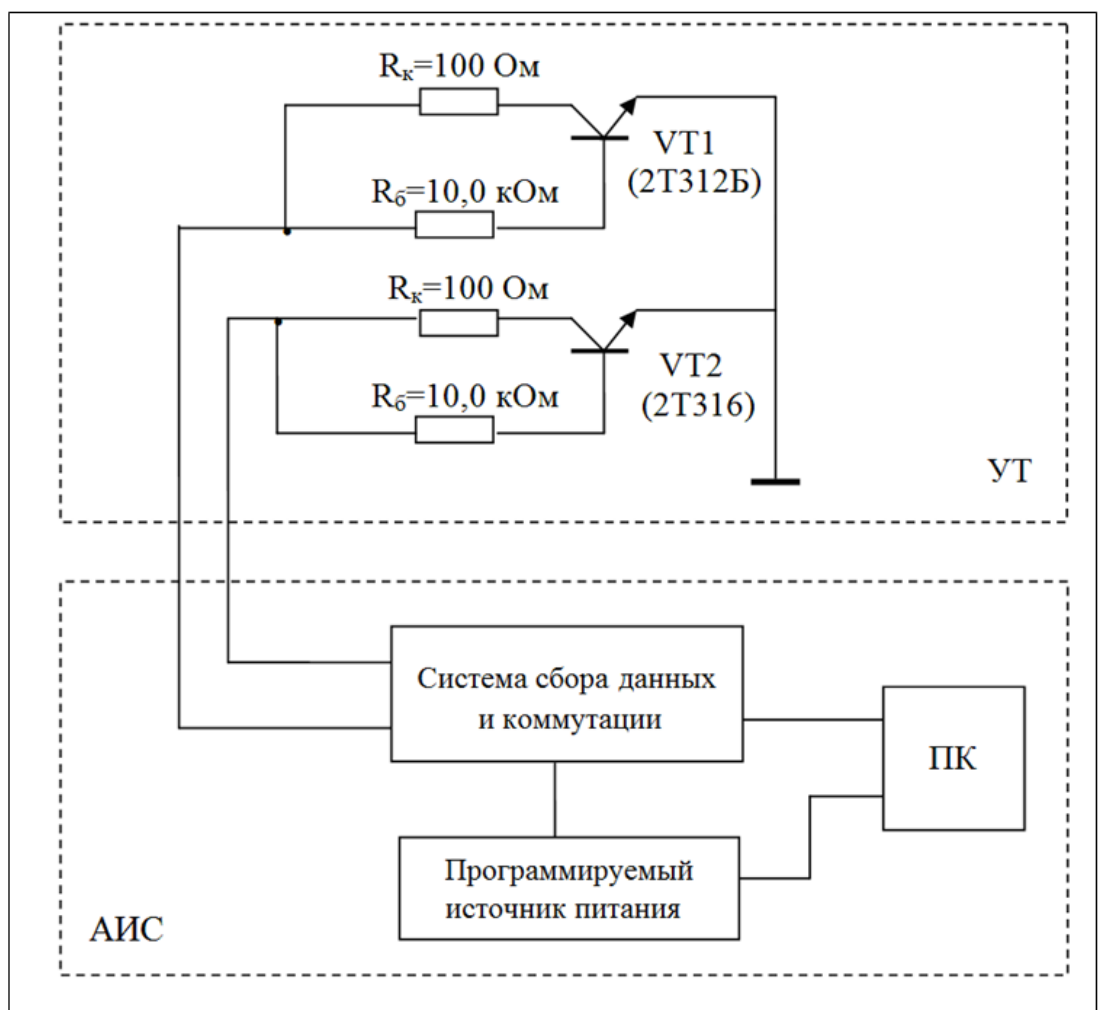


Рис.1.2. Схема подключения МСП в активном режиме измерений

В соответствии с циклограммой испытаний на выходе программируемого источника питания устанавливается напряжение +5,0 В. Затем с помощью системы сбора данных/коммутации последовательно измеряется ток потребления каждого МСП (суммарный коллекторный и базовый ток каждого транзистора) и рассчитывается значение их коэффициента усиления H_{21E} :

$$H_{21E} = \frac{I_k}{I_b} = \frac{(I_k + I_b) - I_b}{I_b} = \frac{I_{\Sigma} R_b}{U_{CC} - 0,7} - 1, \quad (1.3)$$

по которому с помощью соотношения (1.1) определяется значение флюенса нейтронов, эквивалентное значению флюенса эталонного реактора.

На начальном этапе облучения определить коэффициент, связывающий значение мощности реактора с эквивалентной плотностью потока нейтронов в точке облучения, и по известной циклограмме работы реакторной установки рассчитываются моменты регистрации контролируемых параметров объектов испытаний, в которые достигаются требуемые значения эквивалентного флюенса нейтронов.

Особенностью предлагаемой процедуры применения МСП является то, что в процессе облучения постоянным поддерживается ток базы. При этом под действием излучения изменяются токи коллектора и эмиттера МСП. Вследствие этого необходимо либо вводить соответствующую поправку, учитывающую зависимость коэффициента повреждения транзисторов от уровня инжекции неосновных носителей в их базу, либо проводить точечную оценку эквивалентного флюенса нейтронов при снижении тока эмиттера в процессе облучения до одного из заранее выбранных значений, при котором проводилась калибровка МСП.

Константа повреждения K_H является функцией тока эмиттера МСП (рисунок 1.3) и имеет вид:

$$K_{H(I_x)} = K_{H(I_0)} \cdot \left(\frac{I_x}{I_0} \right)^\beta, \quad (1.4)$$

где $K_{H(I_0)}$, $K_{H(I_x)}$ – значения константы повреждения, соответствующее токам эмиттера МСП при калибровке (I_0) и при измерениях (I_x).

β – показатель степенной зависимости.

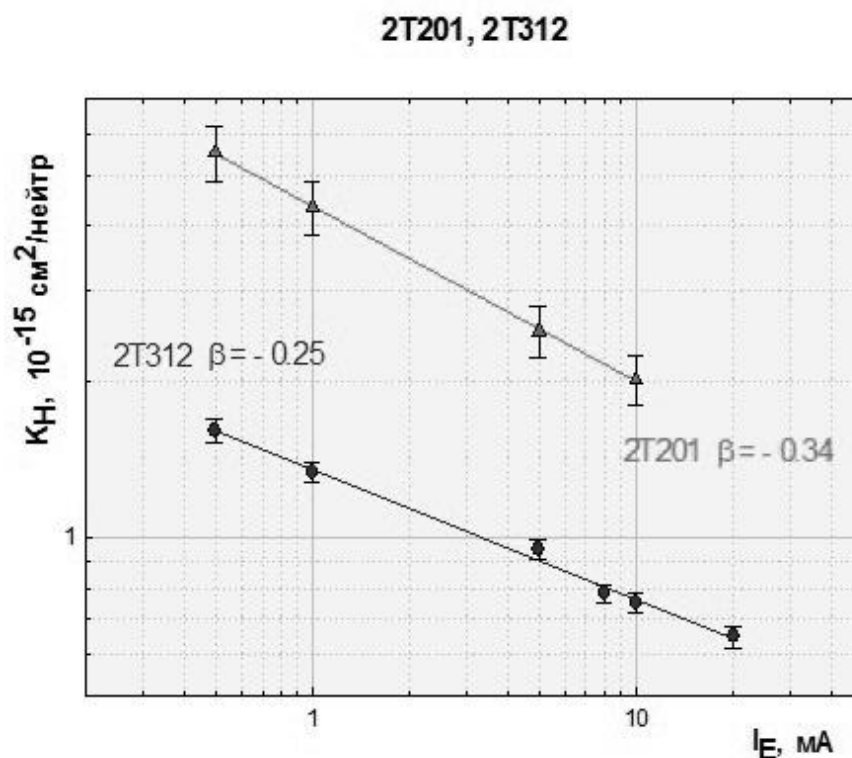


Рис. 1.3. Зависимость константы повреждения БТ (K_H) от тока эмиттера

Таким образом, используя соотношения (1.2), (1.3) с учетом (1.4) могут быть рассчитаны значения эквивалентного флюенса нейтронов, соответствующего изменению коэффициента усиления МСП, в том числе при отличающихся значениях тока эмиттера.

Методика применения МСП при оперативном определении уровней нагружения комплексных изделий в условиях испытаний с неизвестным спектром нейтронов

При применении калиброванных МСП для определения уровней нагружения изделий в условиях испытаний на источниках нейтронов с неизвестным спектром реализуется следующий алгоритм работы.

1. При использовании МСП для оперативной дозиметрии излучений для выбранного значения тока эмиттера МСП (в диапазоне значений от 1 мА до 10 мА) определяются значения H_{21E} МСП до и после облучения на эталонном реакторе (режим облучения МСП – пассивный), и рассчитывается значение константы повреждения K_H для выбранного электрического режима МСП и значение параметра β .

2. До испытаний проводится измерение тока потребления каждого МСП (I_0), по результатам которых рассчитываются исходные значения коэффициентов усиления каждого из МСП (H_{210}).

3. В соответствии с циклограммой работы регистрируются текущие значения токов потребления каждого из МСП (I_x), и по формуле (1.3) рассчитываются текущие значения коэффициентов усиления каждого из транзисторов КТ312 (H_{21x}).

4. Используя текущие значения токов потребления МСП, рассчитываются уточненные значения константы повреждения по формуле:

$$K_{H(I_x)} = K_{H(I_3)} \cdot \left(\frac{I_x}{I_3} \right)^\beta$$

где $K_{H(I_3)}$ – константа повреждения при заданном токе потребления, значение которой получено при калибровке.

β – значение параметра, определенное по результатам калибровки при двух типовых значениях тока потребления МСП (типовые значения I_3 для МСП типа 2Т312 – 1,0 мА и 10 мА).

I_x – текущее значение тока потребления МСП (эмиттерного тока БТ).

5. Рассчитывается эквивалентный флюенс нейтронов с энергией более 0,1 МэВ в местах расположения МСП по формуле:

$$\Phi_{n_эkv} = \frac{\Delta_n}{K_H}$$

где $\Delta_n = \frac{1}{H_{21x}} - \frac{1}{H_{21o}}$.

6. По достижению эквивалентным флюенсом нейтронов $\Phi_{n_эkv}$ заранее установленных значений принимается решение о проведении проверок работоспособности комплексного изделия.

Автоматизация измерений позволяет достаточно точно определить момент времени, при котором ток МСП снижается до значения, при котором уровни нагружения соответствуют требуемой циклограмме испытаний комплексного изделия.

Схема измерительного стенда

Для выполнения измерений начальных значений параметров МСП собираем измерительный стенд, структурная схема которого приведена на рисунке 2.1.

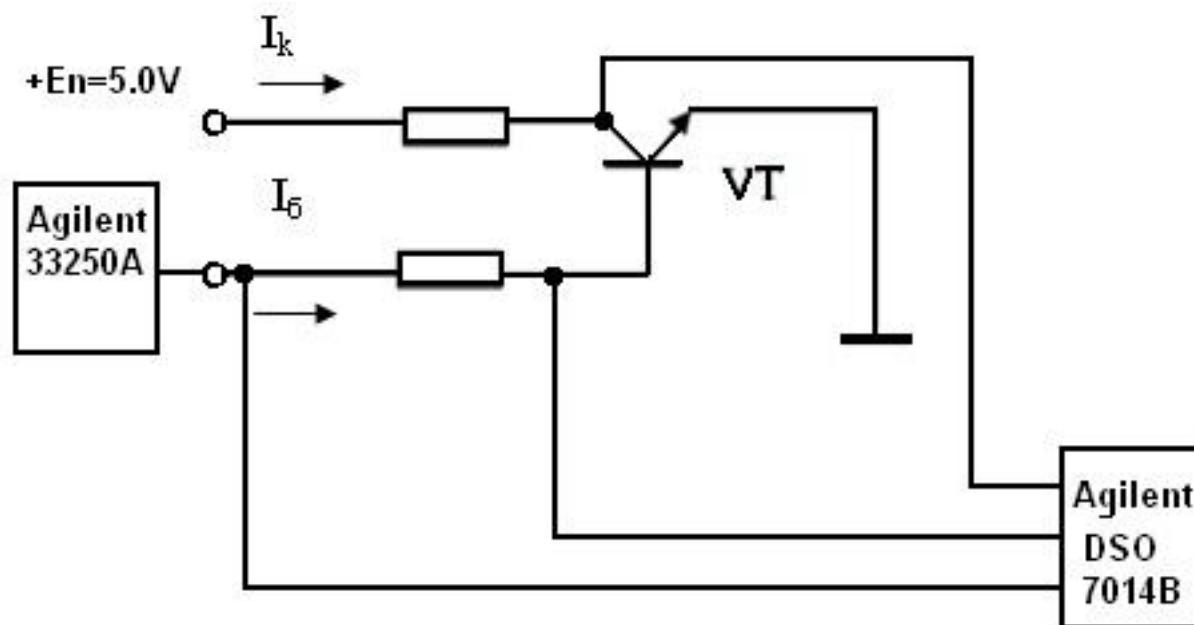


Рис. 2. Структурная схема измерительного стенда

Последовательность выполнения измерений:

1. На выходе источника питания устанавливаем рабочее напряжение плюс 5,00 В.
2. На выходе генератора сигналов Agilent 33250A устанавливаем периодический сигнал с линейно возрастающей амплитудой со следующими параметрами:
- начальное смещение – 0,0 В;

- частота следования сигнала – 1,2 кГц;
- амплитуда – 1,0 В.
- 3. Выход генератора Agilent 33250А соединяем с первым входом осциллографа Agilent DSO 7014В и через резистор $R_k=8,95$ кОм с базой транзистора 2Т312В и устанавливаем чувствительность первого канала осциллографа Agilent 7014В 500 мВ/дел.
- 4. Базу транзистора соединяем со вторым входом осциллографа Agilent 7014В и устанавливаем чувствительность второго канала осциллографа 500 мВ/дел.
- 5. Коллектор транзистора 2Т312В соединяем с третьим входом осциллографа Agilent 7014В и устанавливаем чувствительность третьего канала осциллографа 500 мВ/дел в режиме контроля сигнала по закрытому входу.
- 6. Переводим осциллограф Agilent 7014В в режим синхронизации от сигнала по первому входу.
- 7. Подключаем выход источника питания через резистор $R_k= 100$ Ом к коллектору транзистора 2Т312В.
- 8. Регистрирует осциллограмму контролируемых сигналов.
- 9. Сохраняем осциллограмму в форматах *.csv (таблица числовых значений параметров сигналов) и *.png (графическое представление сигналов).
- 10. Повторяем последовательность операций по пп. 1) – 9) для трех других МСП (транзисторов 2Т312В).

Результаты измерений.

Измерение исходных параметров МСП до облужения

Внешний вид файла с расширением *.csv приведен на рисунке 3.1 для транзистора № 4, на рисунке 3.2 – графический файл с расширением *.png

x-axis	1	2	3
Second	Volt (U _{вх.})	Volt (U _{бэ})	Volt(U _{вых.})
-398.00E-06	+1.95313E-03	+7.22656E-03	+306.24998E-03
-397.00E-06	+3.90625E-03	+10.15625E-03	+305.27341E-03
-396.00E-06	+5.85938E-03	+13.08594E-03	+305.27341E-03
-395.00E-06	+9.76563E-03	+15.03906E-03	+305.27341E-03
-394.00E-06	+11.71875E-03	+17.96875E-03	+305.27341E-03
...
-76.00E-06	+757.81250E-03	+629.29688E-03	+209.57029E-03
-75.00E-06	+759.76563E-03	+629.29688E-03	+208.59373E-03
-74.00E-06	+763.67188E-03	+630.27344E-03	+206.64060E-03
-73.00E-06	+765.62500E-03	+630.27344E-03	+205.66404E-03
-72.00E-06	+767.57813E-03	+630.27344E-03	+203.71091E-03
...
+423.00E-06	+1.92578125E+00	+698.63281E-03	-664.45315E-0
+424.00E-06	+1.92968750E+00	+698.63281E-03	-666.40627E-0
+425.00E-06	+1.93164063E+00	+698.63281E-03	-668.35940E-0
+426.00E-06	+1.93359375E+00	+698.63281E-03	-670.31252E-0

Рис. 3.1. Табличное представление файла с расширением *.csv для МСП № 4

Определяем значения тока базы, соответствующие значениям тока эмиттера 1,0 мА и 10 мА.

Вносим полученные значения в таблицу 2 и рассчитываем для каждого транзистора 2Т312В значения коэффициента усиления при токах эмиттера 1,0 мА и 10 мА.

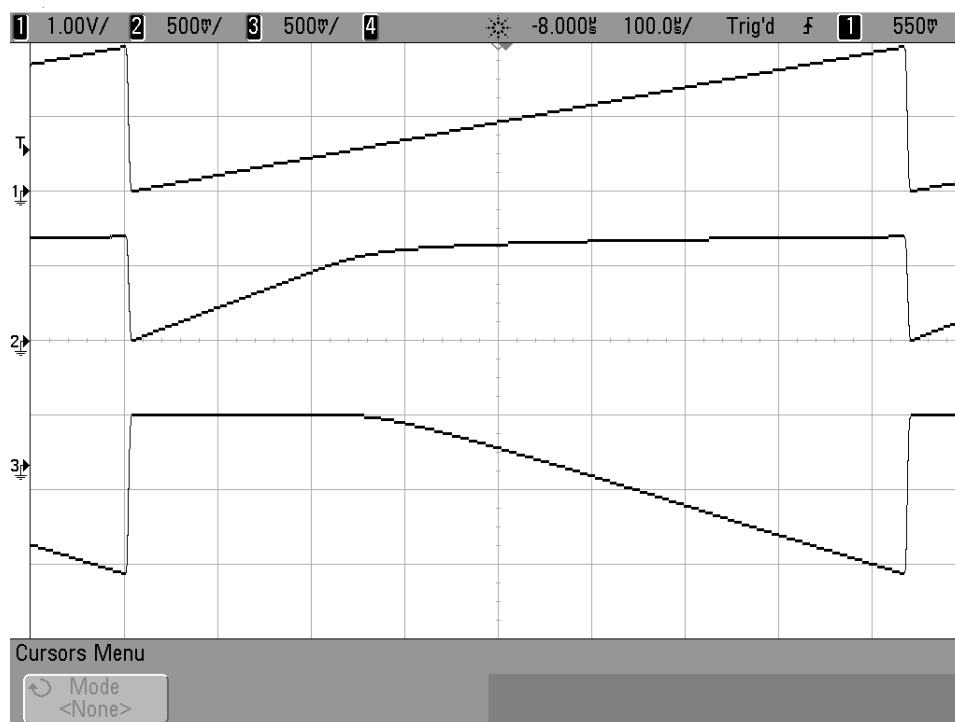


Рис. 3.2. Графическое представление файла с расширением *.png для МСП № 4

Таблица 2. Результаты измерений и рассчитанные значения коэффициента усиления БТ до облучения

транзистор 2Т312Б № 1								
	№ изм.	U1, mV	U2, mV	ΔV, mV	Iб, mA	Iэ, mA	H ₂₁	Iк mA
Iэ≈1mA	112	751	630	121	0,014	1	71,4	0,986
Iэ≈10mA	909	1855	701	1154	0,130	10	76,9	9,870
транзистор 2Т312Б № 2								
	№ изм.	U1 mV	U2 mV	ΔU mV	Iб mA	Iк mA	H ₂₁	Iэ mA
Iэ≈1mA	112	781	636	145	0,016	1	62,5	0,984
Iэ≈10mA	937	1936	702	1234	0,139	9,260	66,7	9,136
транзистор 2Т312Б № 3								
	№ изм.	U1 mV	U2 mV	ΔU mV	Iб mA	Iк mA	H ₂₁	Iэ mA
Iэ≈1mA	133	755	625	130	0,015	1	66,7	0,98
Iэ≈10mA	909	1869	694	1175	0,132	10	75,8	9,882
транзистор 2Т312Б № 4								
	№ изм.	U1 mV	U2 mV	ΔU mV	Iб mA	Iк mA	H ₂₁	Iэ mA
Iэ≈1mA	113	763	630	133	0,015	1	66,7	0,985
Iэ≈10mA	937	1933	698	1235	0,139	9,750	70,2	9,621

Измерение параметров МСП после облучения

Облучение МСП в эталонном спектре были проведены на реакторе БАРС-4 при значении флюенса нейтронов.

На реакторе БАРС-4 проводится облучение транзисторов 2Т312В флюенсом нейтронов со значением $1,0 \cdot 10^{13}$ нейтр./см²

После облучения выполняем измерение параметров транзисторов 2Т312В аналогично пп. 1) – 10) раздела 3.1.

Проводим обработку результатов измерений и заполняем таблицу 3.

Таблица 3. Результаты измерений и рассчитанные значения коэффициента усиления БТ после облучения

транзистор 2Т312Б № 1

	№ изм.	U1, mV	U2, mV	ΔV, mV	I _б , mA	I _э , mA	H ₂₁	I _к mA
I _э ≈1mA	112	751	630	121	0,014	1	49,0	0,986
I _э ≈10mA	909	1855	701	1154	0,130	10	61,4	9,870
транзистор 2Т312Б № 2								
	№ изм.	U1 mV	U2 mV	ΔU mV	I _б mA	I _к mA	H ₂₁	I _э mA
I _э ≈1mA	112	781	636	145	0,016	1	47,5	0,984
I _э ≈10mA	937	1936	702	1234	0,139	9,260	58,6	9,136
транзистор 2Т312Б № 3								
	№ изм.	U1 mV	U2 mV	ΔU mV	I _б mA	I _к mA	H ₂₁	I _э mA
I _э ≈1mA	133	755	625	130	0,015	1	48,1	0,98
I _э ≈10mA	909	1869	694	1175	0,132	10	59,2	9,882
транзистор 2Т312Б № 4								
	№ изм.	U1 mV	U2 mV	ΔU mV	I _б mA	I _к mA	H ₂₁	I _э mA
I _э ≈1mA	113	763	630	133	0,015	1	50,5	0,985
I _э ≈10mA	937	1933	698	1235	0,139	9,760	58,4	9,621

На основании выполненных измерений параметров МСП до и после облучения определяем значения параметров $K_{H(1,0)}$, $K_{H(10)}$ и β для каждого транзистора по формулам:

$$K_H = \left(\frac{1}{H_{21E}(\Phi_{n-эм})} - \frac{1}{H_{21E}(0)} \right) / \Phi_{n-эм},$$

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{K_{H(1,0)}}{K_{H(10,0)}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{(1,0)}}{I_{(10,0)}}\right)}$$

Заносим данные по характеристикам транзисторов 2Т312В в таблицу 4.

Таблица 4. Параметры чувствительности МСП

№ МСП	I _(1,0) , mA	I ₍₁₀₎ , mA	K _{H(1,0)} , x10 ⁻¹⁵ см ⁻² н	K _{H(10)} , x10 ⁻¹⁵ см ⁻² н	β
1	1,0	10,0	0,64	0,33	-0,287
2	1,0	9,260	0,505	0,21	-0,394
3	1,0	10,0	0,58	0,37	-0,195
4	1,0	9,760	0,66	0,28	-0,376

Полученные характеристики в дальнейшем будут использованы для выполнения оперативной оценки эффективного значения флюенса нейтронов при облучении объектов испытаний на моделирующих установках с неизвестным составом и спектром излучения.

Выводы

1. Выполнены измерения характеристик МСП до и после облучения на эталонном реакторе БАРС-4.
2. Рассчитана радиационная чувствительность четырех экземпляров МСП.
3. Образцы МСП подготовлены для оперативной оценки уровней нагружения объектов испытаний.

Литература

1. Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969. - 311 с.: ил.
2. Кулаков В. М., Ладыгин Е. А., Шаховцев В. И и др. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. Е. А. Ладыгина. - М.: Сов.радио, 1980. - 224 с.

3. *Мырова Л. О., Чепиженко А. З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям - М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
4. *Коледов Л. А., Волков В. А., Докучаев Н. И. и др.* Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование. Учебное пособие для вузов. Под ред. Л. А. Коледова. М.: Высшая школа, 1984 г. – 231 с.