

Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем

О.В. Дворников

**д.т.н., доц. (ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн",
г. Минск, Беларусь)**

oleg_dvornikov@tut.by



Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

Особенности 1,5 мкм БиПТП- технологии

Применение известных конструктивно-технологических способов увеличения радиационной стойкости (полной диэлектрической изоляции, тонкопленочных резисторов, вертикальных $p-n-p$ - транзисторов с тонкой активной базой и др.) приводит к существенному удорожанию ИС.

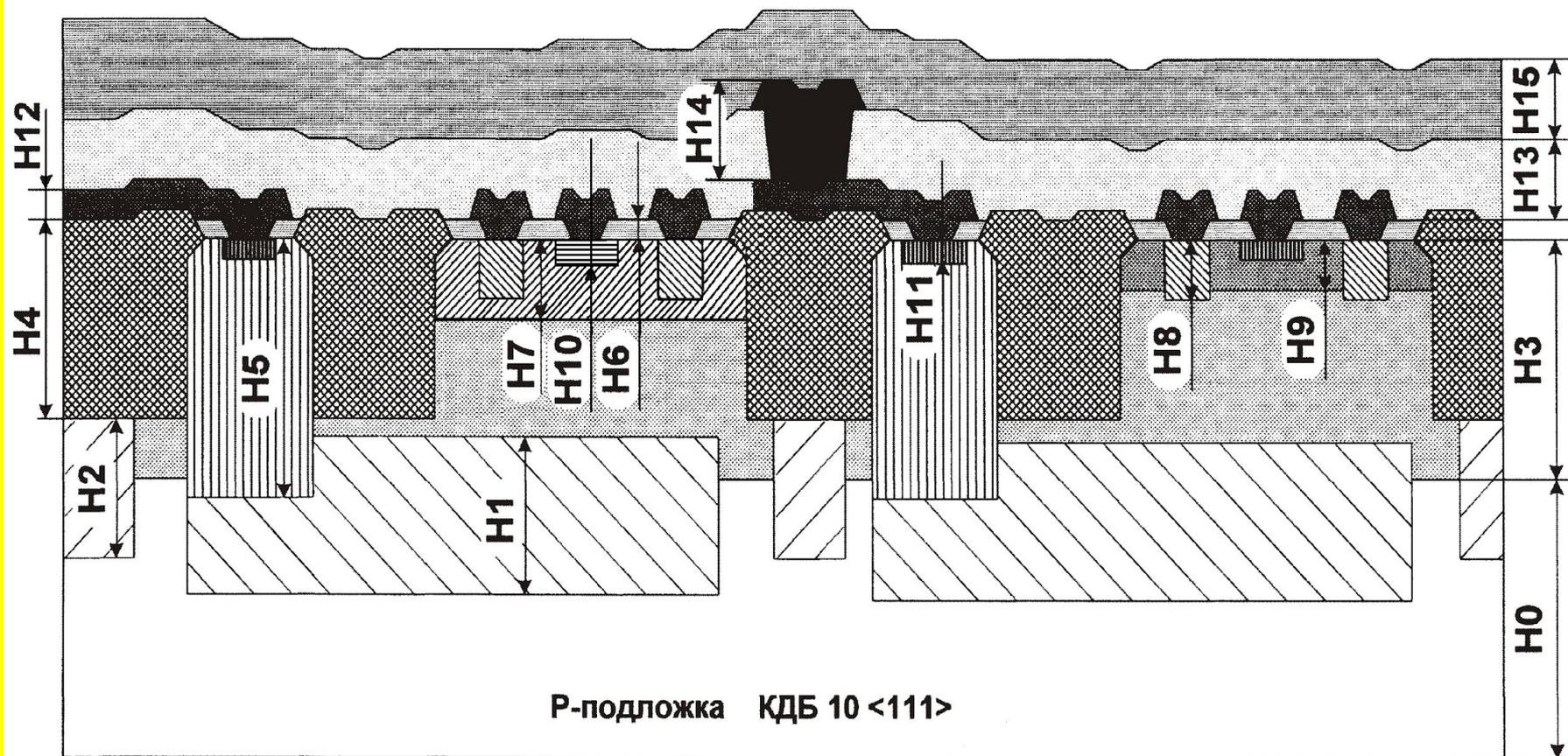
При создании на ОАО «Интеграл» (г. Минск, Беларусь) маршрута изготовления микросхем с биполярными (БТ), полевыми транзисторами с $p-n$ - переходом (ПТП) и проектной нормой 1,5 мкм использован компромиссный подход, ориентированный на одновременное увеличение быстродействия, уменьшение шумов и стоимости, обеспечение радиационной стойкости, а именно:

- формирование комбинированной изоляции элементов диэлектриком и p^+ - скрытым слоем для уменьшения площади $p-n$ - переходов и предотвращения «защелкивания» транзисторных структур при радиационном воздействии;

Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

- уменьшение всех топологических размеров;
- уменьшение глубины залегания базовой и эмиттерной областей $n-p-n$ - транзистора и максимальное увеличение концентрации примеси в них;
- конструктивное исключение соприкосновения областей n^+ - эмиттера и диэлектрической изоляции для предотвращения тока утечки между коллектором и эмиттером $n-p-n$ - транзистора по окислу;
- формирование резисторов на сильнолегированных полупроводниковых областях;
- повышение плотности тока в транзисторных структурах до границы наступления эффектов высокого уровня инжекции.

Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС



Вид структуры кристалла

Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

Элементы структуры		Обозначение	Толщина, мкм	Тип проводимости	Поверхностное сопротивление, Ом/•
Пластина кремниевая эпитаксиальная со скрытым слоем	Подложка	H0	460±20	p	10±2,0 Ом/см
	N+ - скрытый слой	H1	6,0±1,0	n+	35±8
	P+ - скрытый слой	H2	2,5±0,3	p+	150±30
	Эпитаксиальный слой	H3	2,3±0,3	n-	1,0±0,1 Ом/см
Разделение		H4	1,35±0,05	–	–
Глубокий коллектор		H5	2,5±0,4	n+	22±4
Базовый окисел		H6	0,22±0,02	–	–
P - канал		H7	1,4±0,3	p-	5500±700
P+ - база		H8	0,6±0,1	p+	80±20
P- база		H9	0,36±0,04	p-	560±60
N+ - затвор		H10	0,4±0,04	n+	60±20
N+ - эмиттер		H11	0,22±0,02	n+	45±5
Металл 1		H12	0,55±0,05	–	–
Межуровневый диэлектрик		H13	0,8±0,1	–	–
Металл 2		H14	1,1±0,1	–	–
Пассивация		H15	0,9±0,1	–	–

Данные по изготовлению отдельных слоев структуры

Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

Параметры транзисторов и тестовых элементов

Наименование параметра, размерность, режим измерения	Норма
<i>n-p-n</i> БТ	
Коэффициент усиления β ($\Delta I_B = 1$ мкА, $V_{CE} = 1$ В, $N_B = 5$)	>100
Пробивное напряжение коллектор- эмиттер V_{CEOBR} , В, (база в обрыве)	>8
Пробивное напряжение коллектор-база V_{CBBR} , В	>12
Пробивное напряжение эмиттер-база V_{EBBR} , В	>4,5
<i>L p-n-p</i> БТ	
Коэффициент усиления β ($\Delta I_B = 1$ мкА, $V_{CE} = 1$ В, $N_B = 5$)	>15
Пробивное напряжение коллектор- эмиттер V_{CEOBR} , В, (база в обрыве)	>8
Пробивное напряжение коллектор-база V_{CBBR} , В	>10
Пробивное напряжение эмиттер-база V_{EBBR} , В	>10

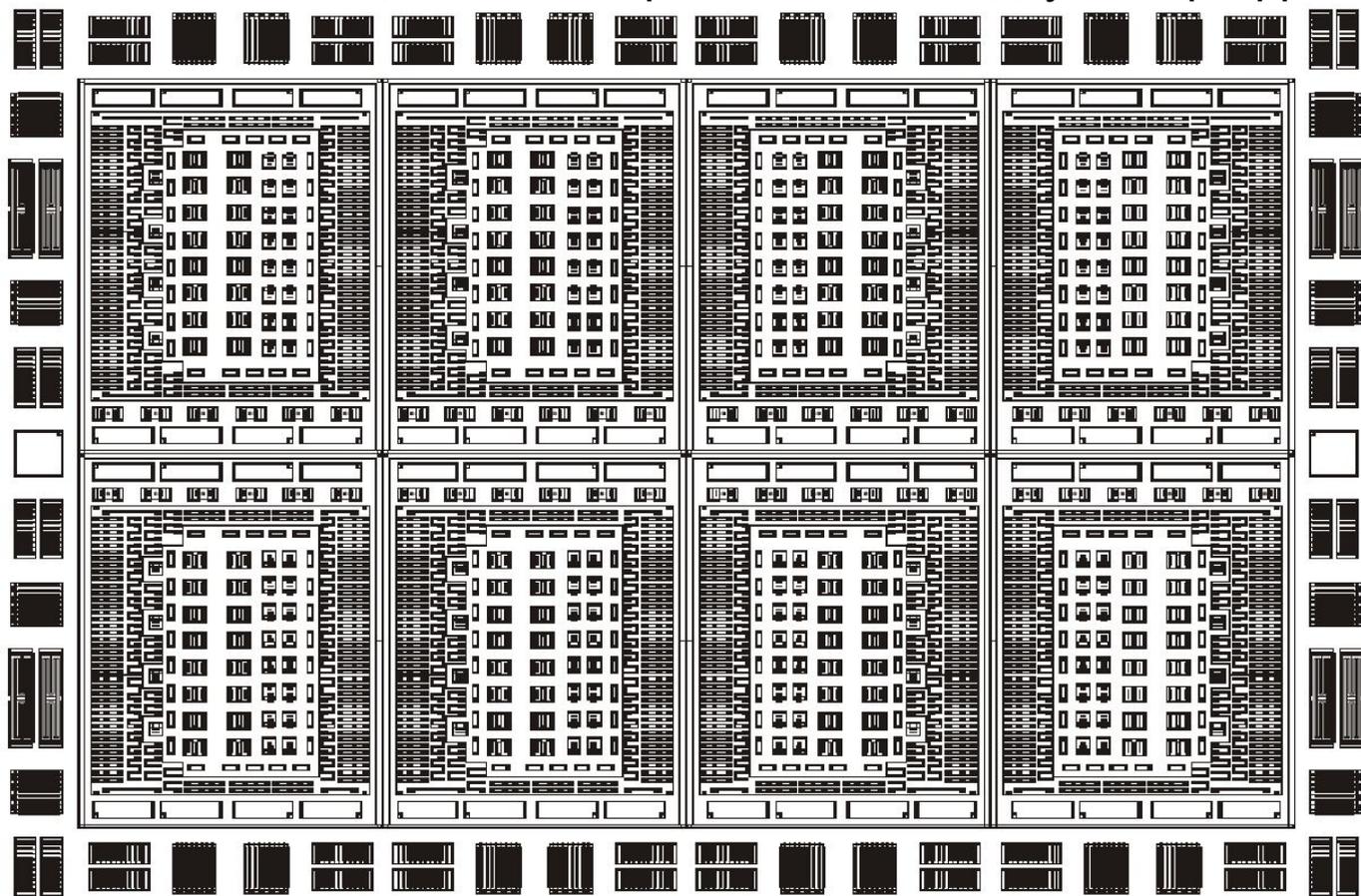
Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

Параметры транзисторов и тестовых элементов

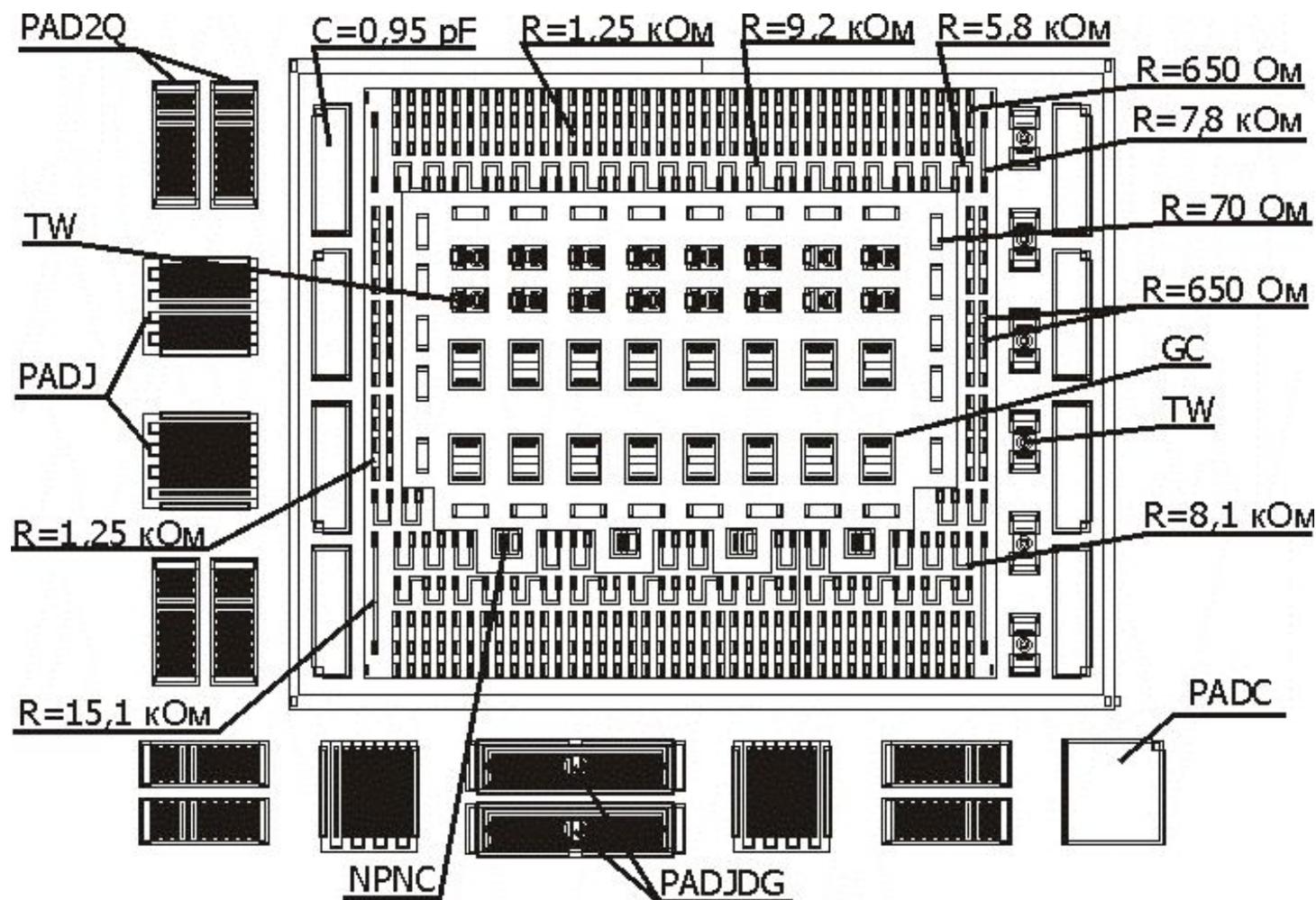
Наименование параметра, размерность, режим измерения	Норма
Малосигнальный <i>p</i>- ПТП	
Максимальный ток стока, мкА, ($V_{DS} = 4 \text{ В}$, $V_{GS} = 0$)	110-220
Напряжение отсечки, В	1,5-2,5
Тестовые элементы	
<i>p</i> - база, сопротивление слоя, Ом/квадрат	500-620
<i>n</i> + - глубокий коллектор, сопротивление слоя, Ом/квадрат	19-25
Напряжение пробоя изоляции, В	>16

Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК 1 3»

На основе 1,5 мкм БиПТП- технологии создан базовый матричный кристалл (БМК) типа «АБМК_1_3» для изготовления маломощных и широкополосных аналоговых ИС. «АБМК_1_3» содержит четыре идентичных канала, каждый из которых состоит из двух макрофрагментов.



Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК_1_3»



Макрофрагмент АБМК_1_3

Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК_1_3»

По периметру БМК расположены сложнофункциональные контактные площадки, которые используются для соединения кристалла проводниками с траверсами корпуса или в качестве элементов ИС:

- *PAD2Q* – два многоэмиттерных малошумящих *n-p-n*-транзистора;
- *PADJ* – малошумящий *p*-ПТП;
- *PADJDG* – два двухзатворных *p*-ПТП;
- *PADC* – МОП- конденсатор с номиналом 2,3 пФ.

Каждый макрофрагмент включает один изолированный карман, в котором размещены резисторы с номиналом от 650 Ом до 15,1кОм и 70 Ом; *n-p-n*-транзисторы (*NPNC*) для источников стабильного тока; МОП- конденсаторы с емкостью 0,95 пФ; функционально-интегрированные элементы (*PNPJF*), представляющие собой каскодное соединение *p-n-p*-транзистора и *p*-ПТП; *n-p-n*-транзисторы с объединенными коллекторами (*GC*); 4-х- слойные полупроводниковые структуры (*TIW*), позволяющие с помощью различного выполнения межсоединений областей получить два *n-p-n*- или *p-n-p*-транзистор.

Результаты радиационных испытаний

Место испытаний: установка ИБР-2, канал №3, Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна, РФ).

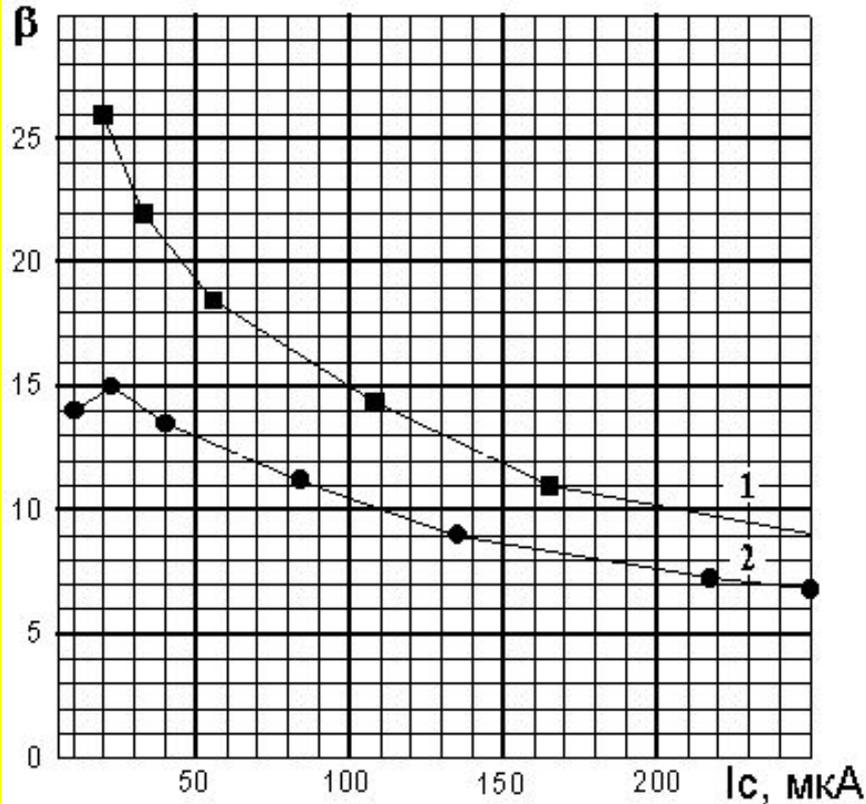
Экспериментальная установка описана в Сообщении ОИЯИ, Р13-96-403. Испытания проведены совместно с Замятиным Н.И. (CMS-RDMS/JINR meeting, Dubna, 15.04.1998).

Объект испытаний: тестовые транзисторы, резисторы, микросхема «Тетрод-Б», изготовленные по 1,5 мкм БиПТП-технологии.

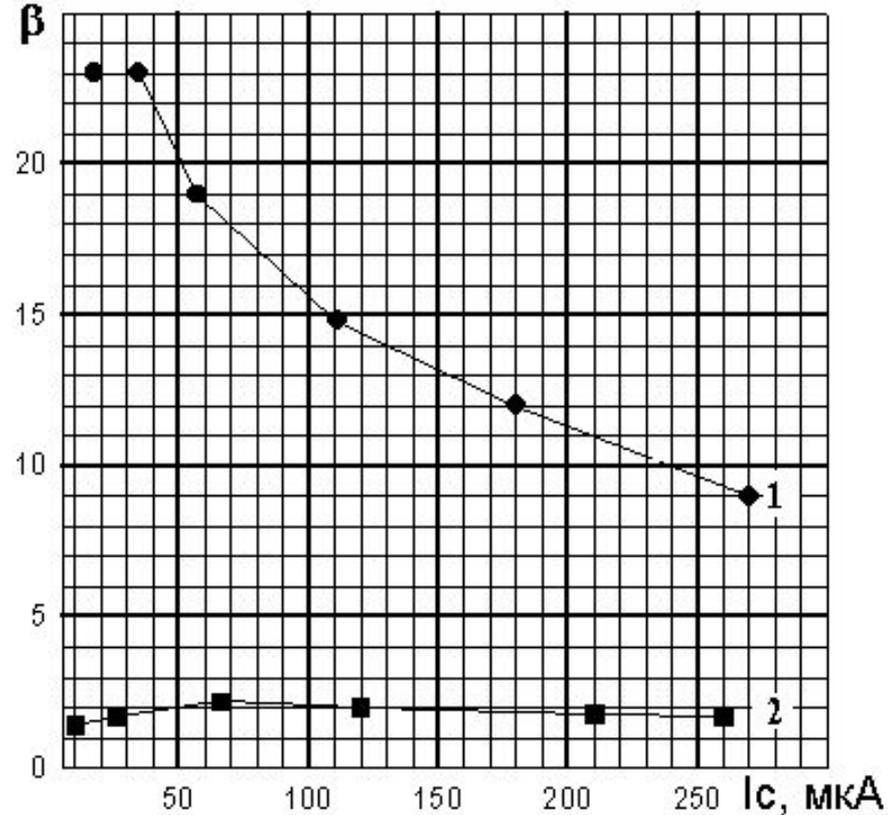
Условия испытаний: гамма-источник - ^{137}Cs , комнатная температура, без электрического режима.

Интегральный поток нейтронов, n/cm^2 , $E_n > 100$ кэВ	Поглощенная доза, Мрад	Плотность потока или мощность дозы
$2 \cdot 10^{14}$	0,12	$2 \cdot 10^{10}$ $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{с})$
$9 \cdot 10^{12}$	-	$2 \cdot 10^{10}$ $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{с})$
-	1,0	180 крад/ч

Результаты радиационных испытаний

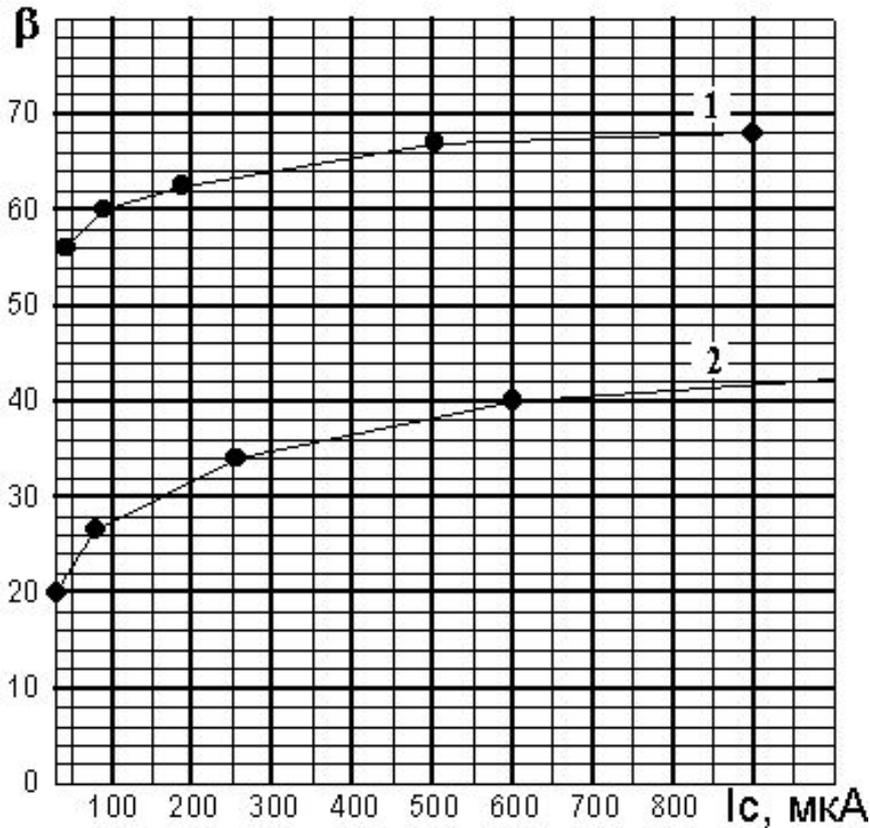


Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора $p-n-p$ - транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов $9 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2$

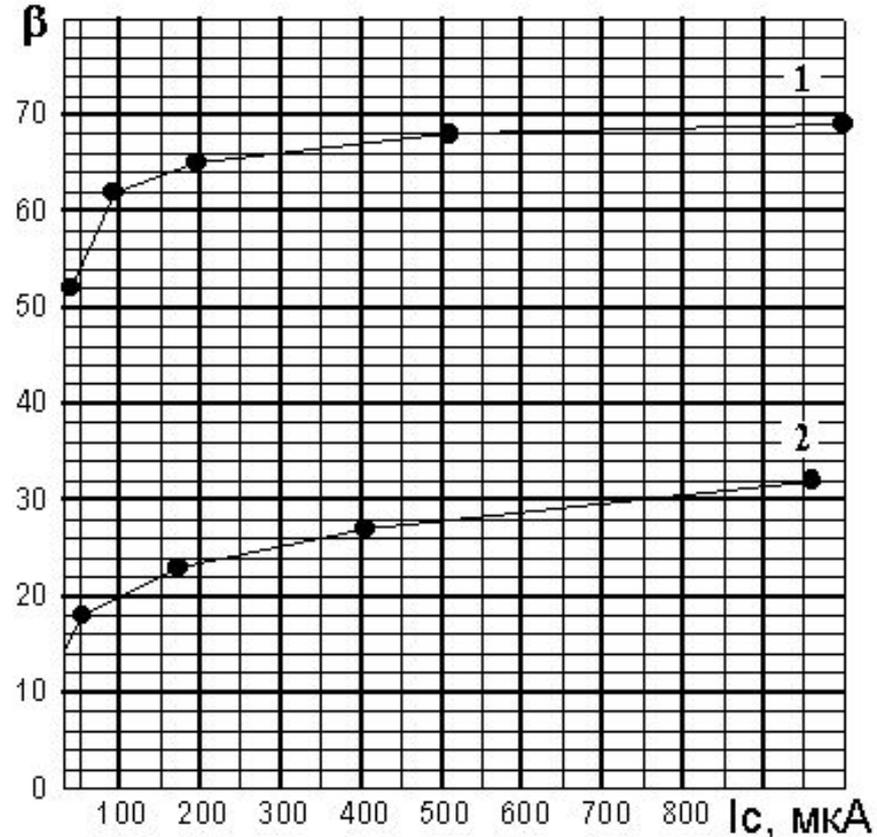


Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора $p-n-p$ - транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов $2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$

Результаты радиационных испытаний

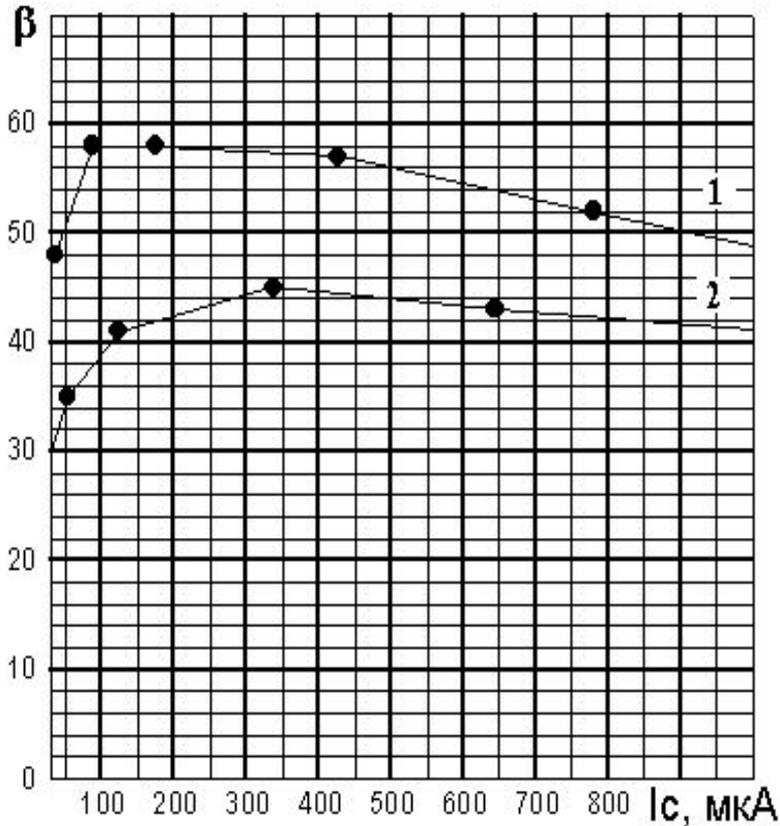


Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малошумящего $n-p-n$ транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов $9 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2$

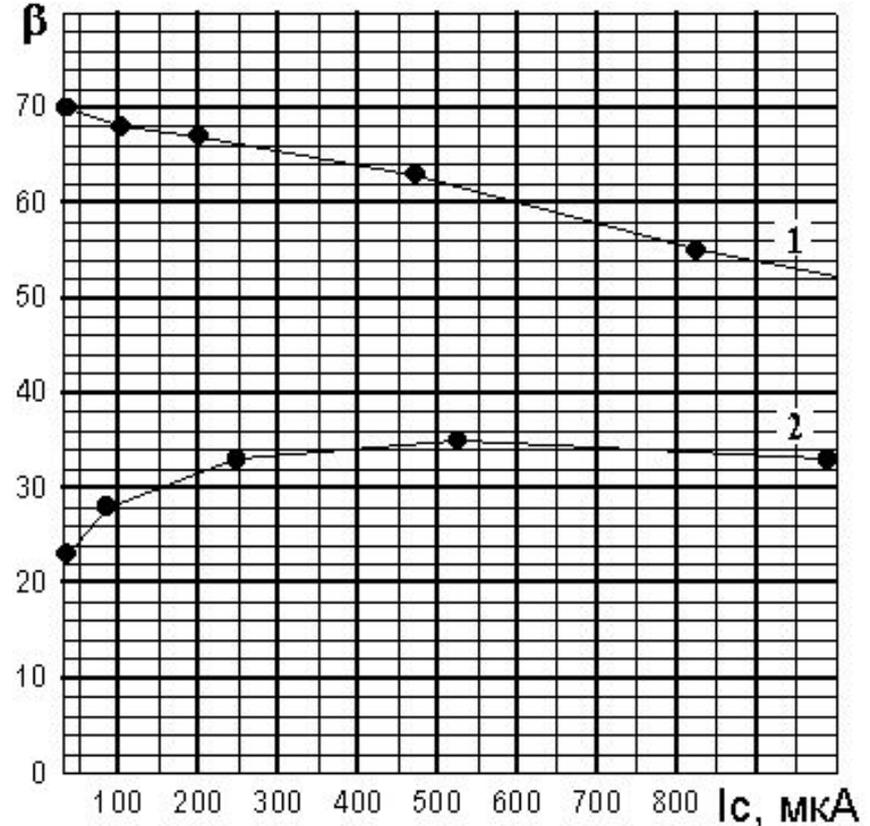


Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малошумящего $n-p-n$ транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов $2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$

Результаты радиационных испытаний

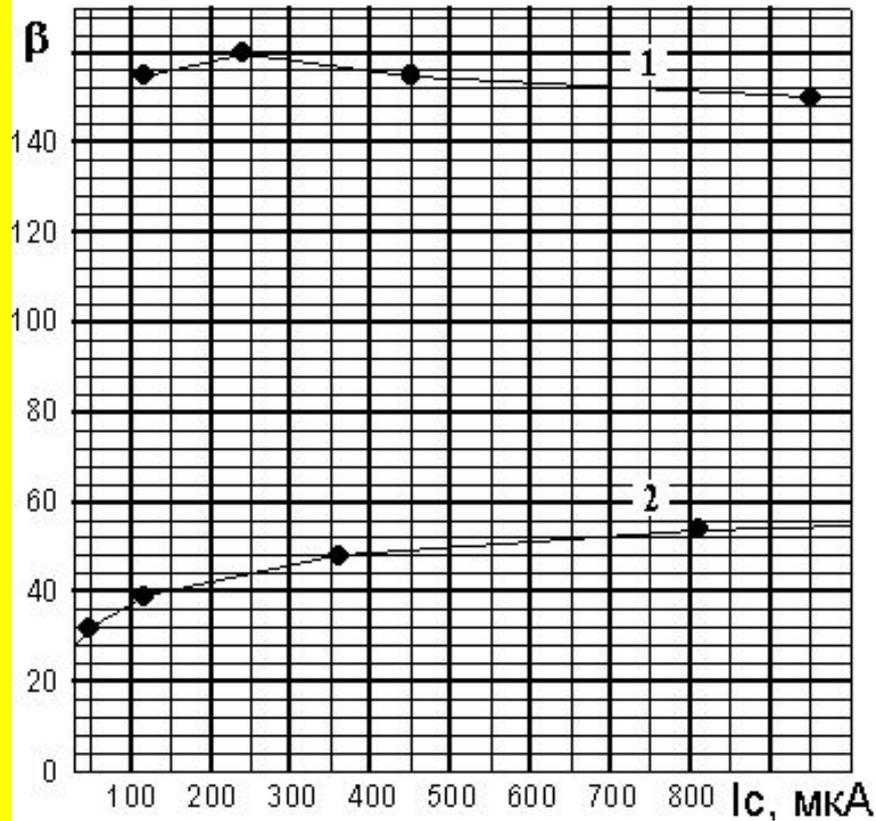


Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малосигнального $n-p-n$ транзистора:
1 – до облучения, 2 – после воздействия потока нейтронов $9 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2$

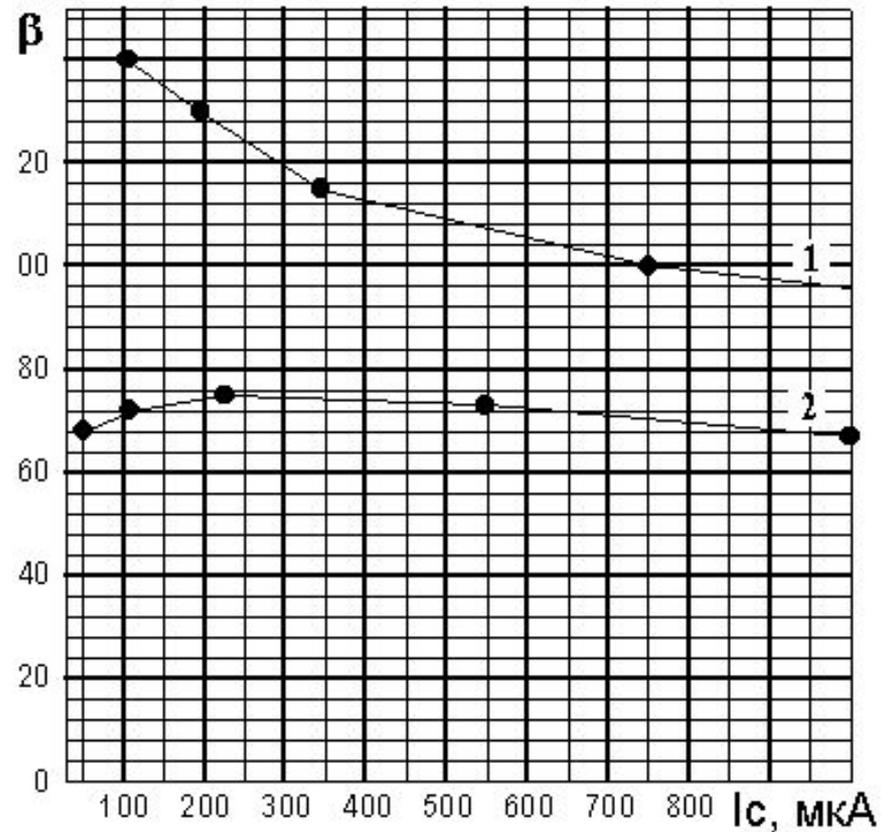


Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малосигнального $n-p-n$ транзистора:
1 – до облучения, 2 – после воздействия потока нейтронов $2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$

Результаты радиационных испытаний

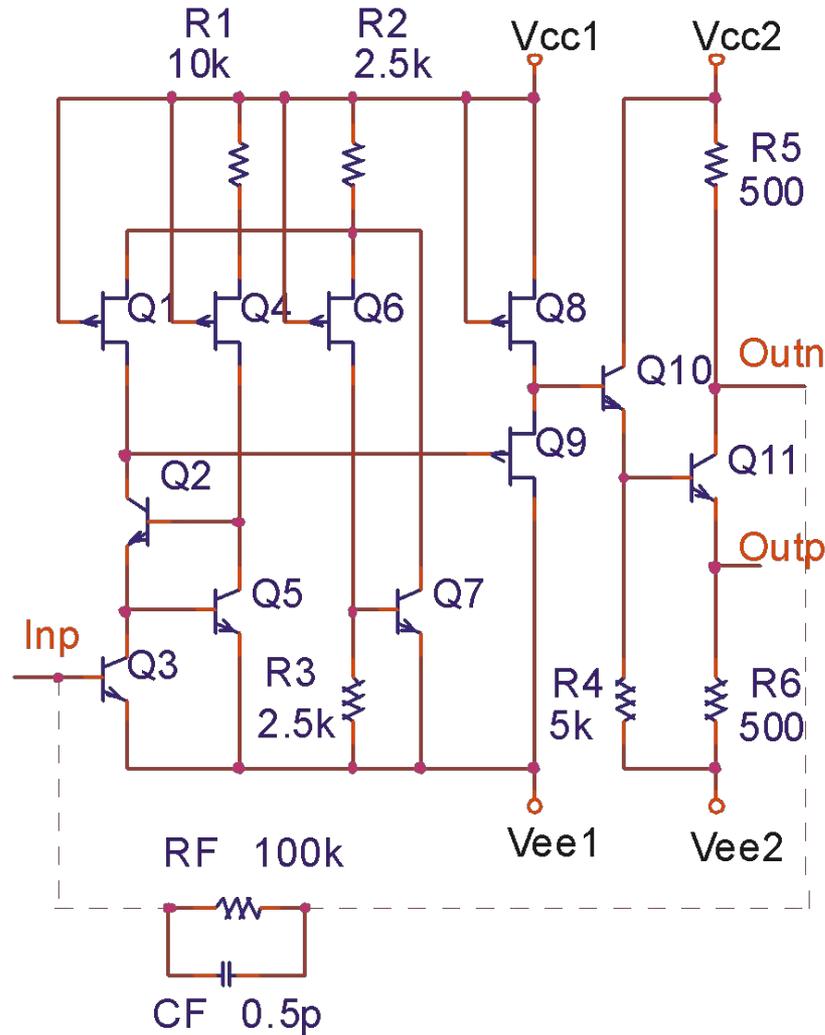


Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малoshумящего *n-p-n* транзистора: 1 – до облучения, 2 – после гамма-облучения, поглощенная доза 1 Мрад



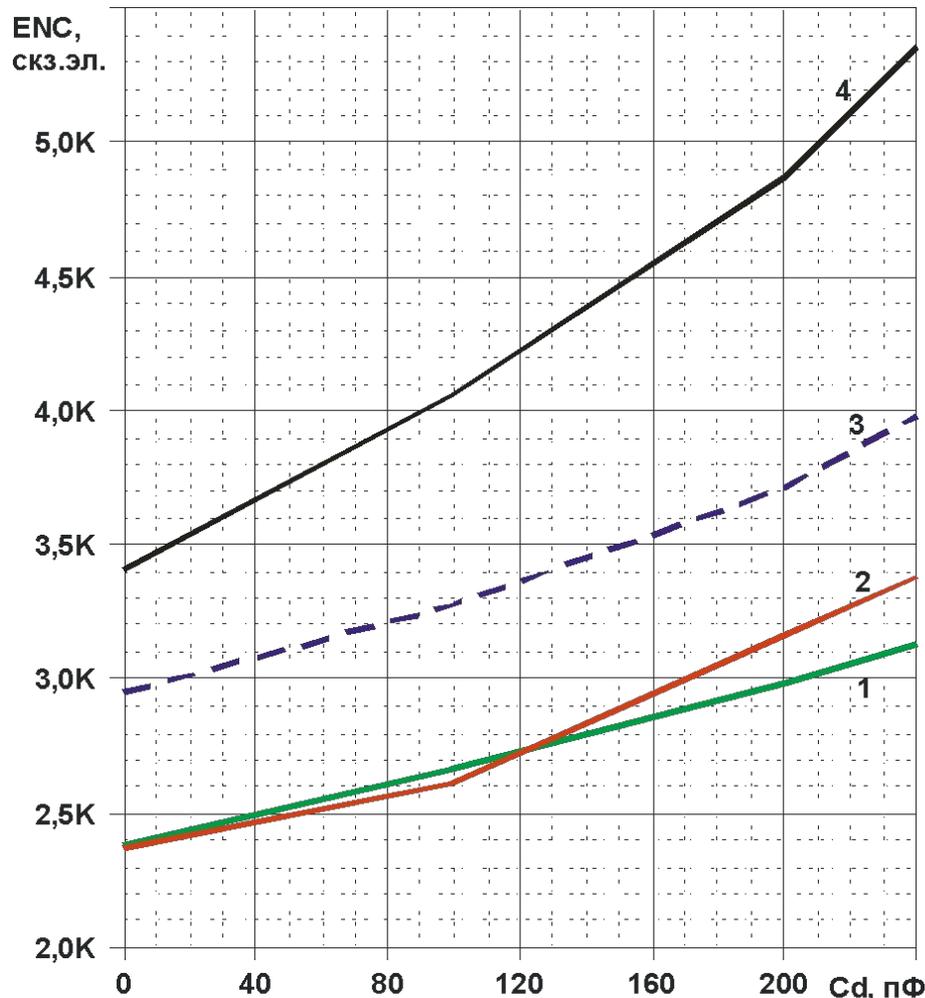
Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малосигнального *n-p-n* транзистора: 1 – до облучения, 2 – после гамма-облучения, поглощенная доза 1 Мрад

Результаты радиационных испытаний



Электрическая схема усилителя Тетрод-Б

Результаты радиационных испытаний



Зависимость эквивалентного шумового заряда (ENC) ИС «Тетрод- Б» от емкости детектора (C_d) при времени формирования $T_p=0,5$ мкс:

- 1 – до облучения,
- 2 - после воздействия потока нейтронов $9 \cdot 10^{12}$ н/см²,
- 3 - после гамма- облучения, поглощенная доза 1 Мрад,
- 4 - после воздействия потока нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ н/см²

$$ENC^2 \approx \alpha_{S2} T_p q \left(\frac{2kT}{qR_F} + \frac{I_E}{\beta} \right) + \frac{\alpha_{S1}}{T_p} kT (C_D + C_F + C_{INPAMP})^2 \frac{\Phi_T}{I_E} + \frac{2\alpha_{S1}}{T_p} kTR_B (C_D + C_F)^2$$

где α_{S1} , α_{S2} – коэффициенты, характеризующие форму импульса на выходе фильтра, соединенного с ИС «Тетрод- Б»

Результаты радиационных испытаний

Выводы по результатам испытаний:

- *n-p-n*, *p*-ПТП сохраняют свою работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ н/см², а горизонтальные *p-n-p*-транзисторы - при потоке нейтронов до $9 \cdot 10^{12}$ н/см².
- Изменение величины сопротивления резисторов при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ н/см² не происходит в пределах погрешности измерений.
- Среднее изменение параметров *p*-ПТП составляет

условия облучения	изменение максимального тока стока, %	изменение напряжения отсечки, %
$2 \cdot 10^{14}$ н/см ²	-18,6	-8,5
$9 \cdot 10^{12}$ н/см ²	-10,0	-3,4
1,0 Мрад	-10,6	-6,0.

Результаты радиационных испытаний

Выводы по результатам испытаний:

- Коэффициент усиления паразитного транзистора (коллектор-коллектор близко расположенных *n-p-n*-транзисторов) чрезвычайно мал (0,1-0,2), не изменяется при гамма-облучении и уменьшается до 0,02 при воздействии потока нейтронов.
- Пробивное напряжение транзисторов при воздействии радиации не ухудшилось.
- Радиационная стойкость разработанных *n-p-n*-транзисторов незначительно уступает зарубежным аналогам, изготовленным по *DMILL* и *H2CMOS*-технологиям.

Результаты радиационных испытаний

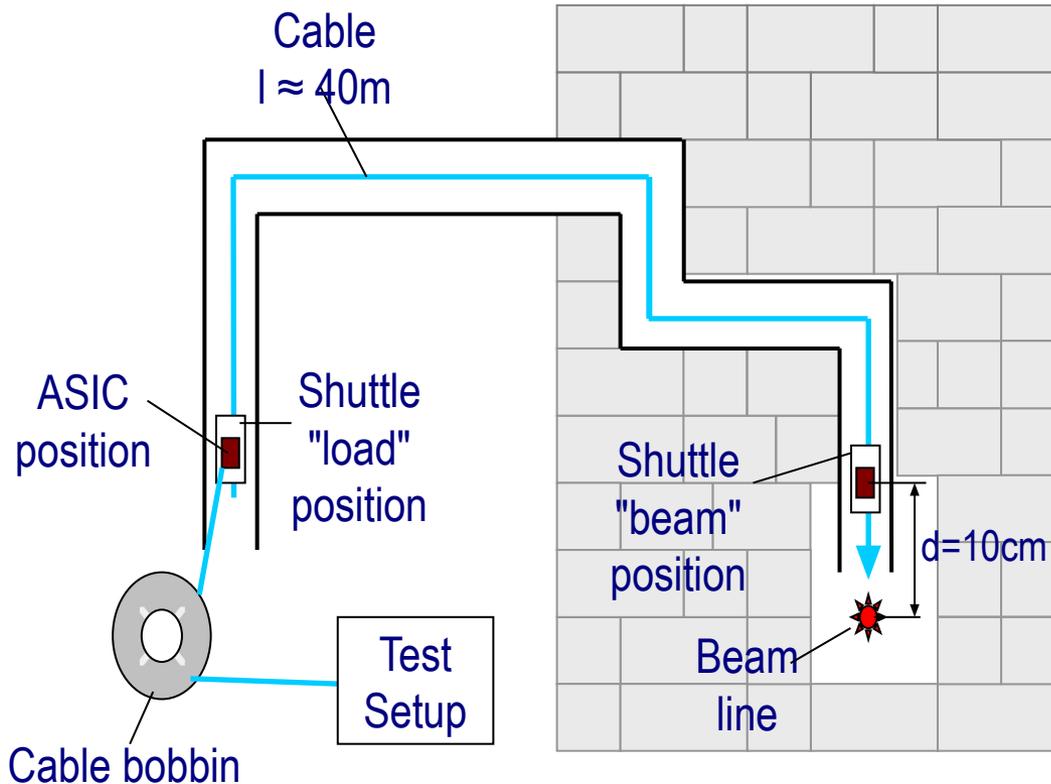
Место испытаний: канал *PS-T8* ускорителя *PS*, стенд *IRRAD2*, Европейский центр ядерных исследований (г. Женева, Швейцария).

Объект испытаний: ИС 8-ми канального усилителя-формирователя-дискриминатора «АНОД», изготовленная по 1,5 мкм БиПТП- технологии. Испытания проведены Чеховским В.А., Солиным А.В.

Условия испытаний: Облучение ИС проводилось в течение нескольких экспозиций, в перерывах между которыми измерялись основные характеристики схемы. Спектр нейтронов - аналогичный ожидаемому на установке *LHC*. Во время облучения осуществлялся контроль напряжения питания и тока потребления ИС, а также регистрировались срабатывания каждого канала.

Результаты радиационных испытаний

Схема проведения эксперимента



Primary PS proton beam :

Beam line: PS-T8

Beam energy : 24 GeV/c

Beam spot (h,v) : 6 x 4 cm²

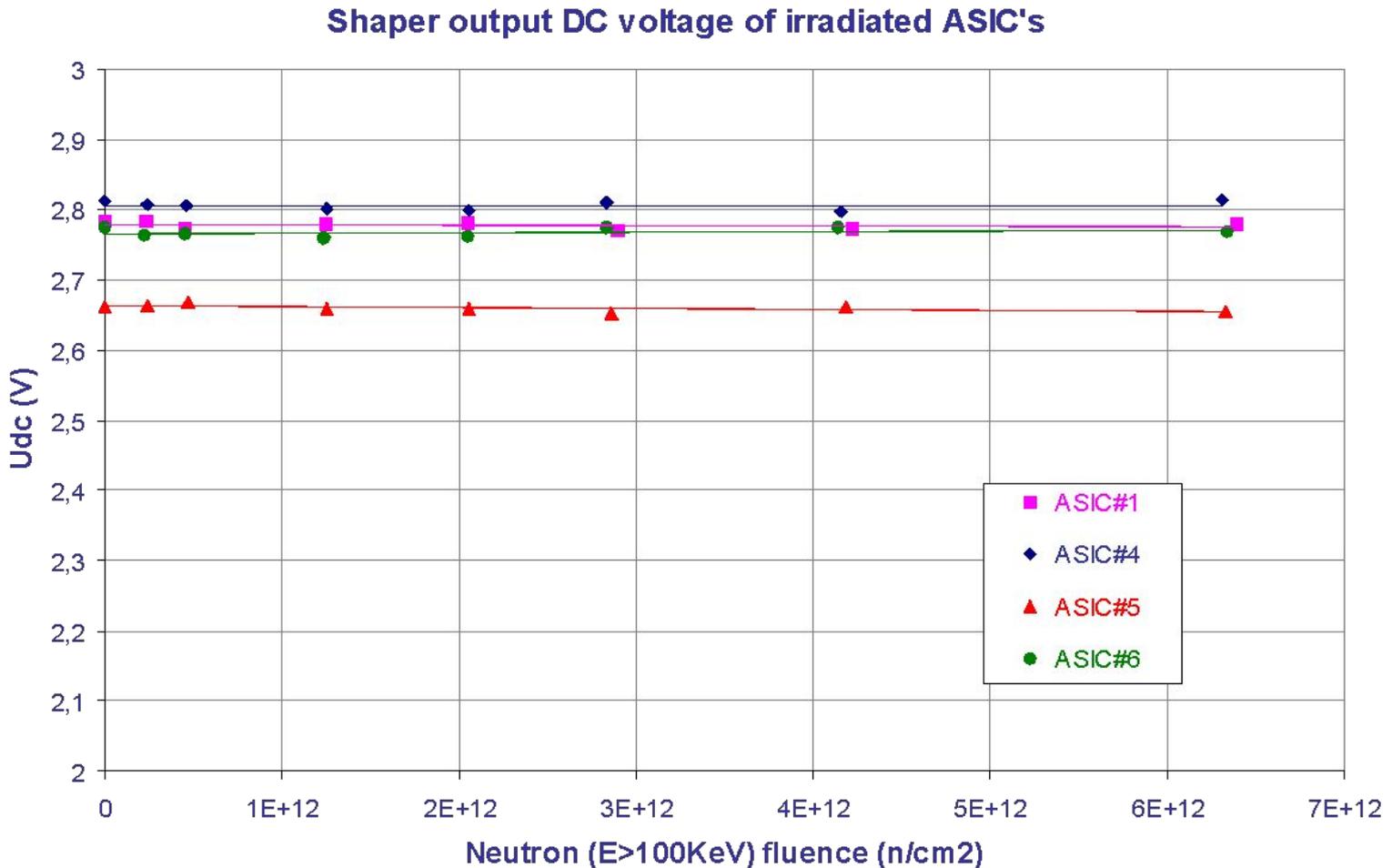
Secondary particles in the irradiation cavity :

neutron : 50 KeV ÷ >20 MeV

p, π⁺, π⁻ : 0.3 ÷ 4 GeV

gamma : 100 KeV ÷ 100 MeV

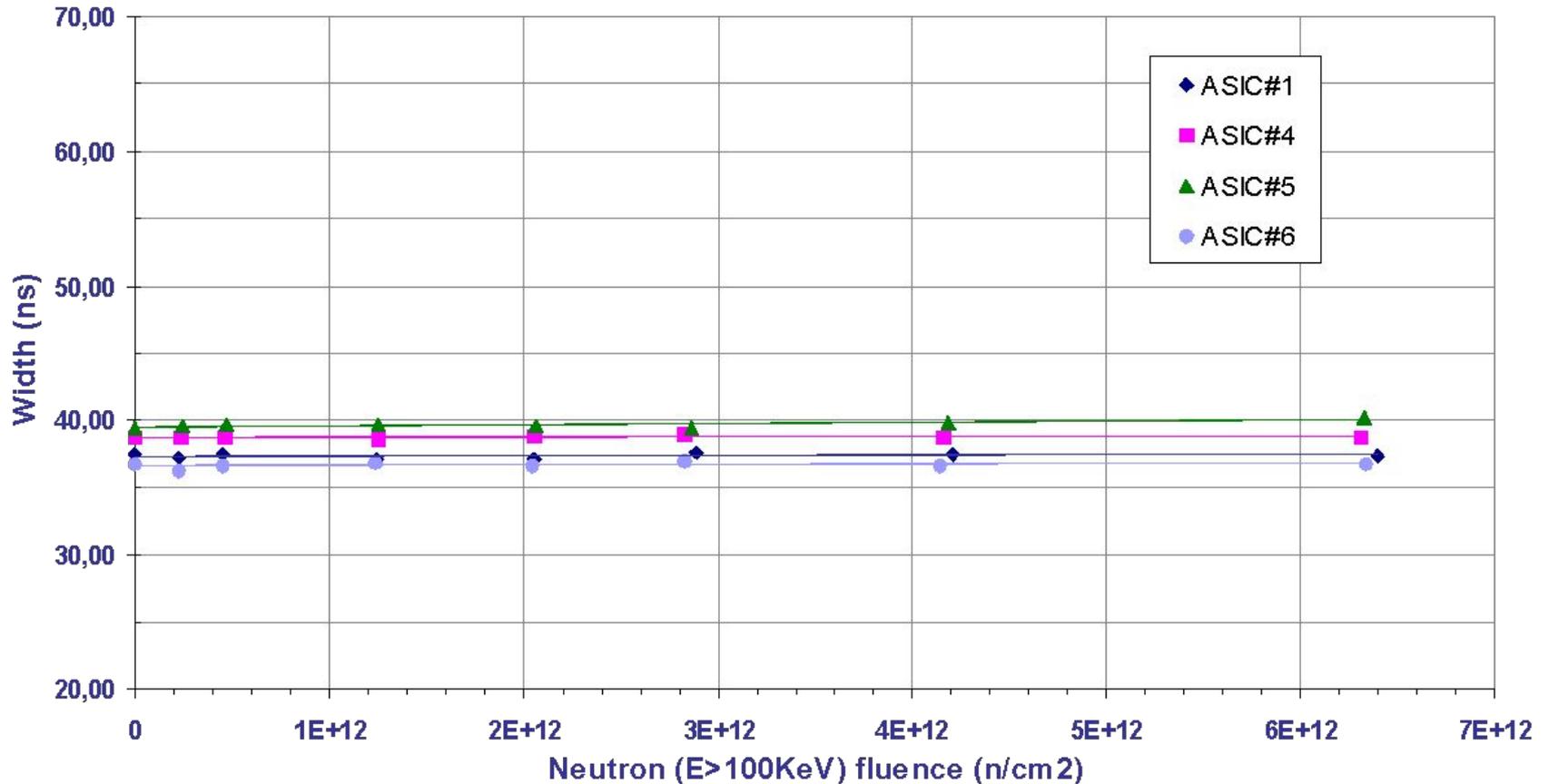
Результаты радиационных испытаний



Зависимость постоянного напряжения на выходе формирователя от интегрального потока нейтронов

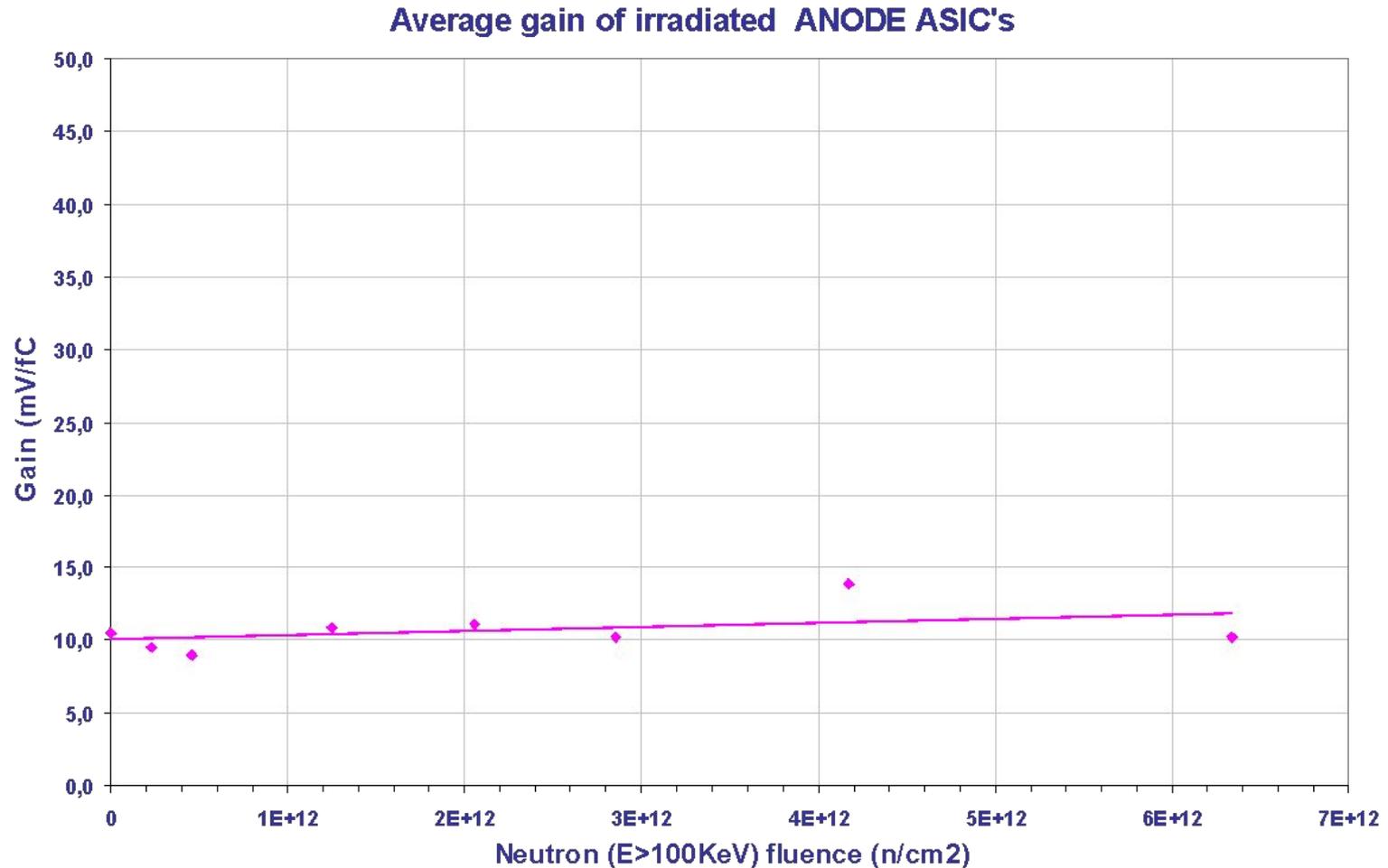
Результаты радиационных испытаний

Average ME1/1 Anode ASIC output pulse width



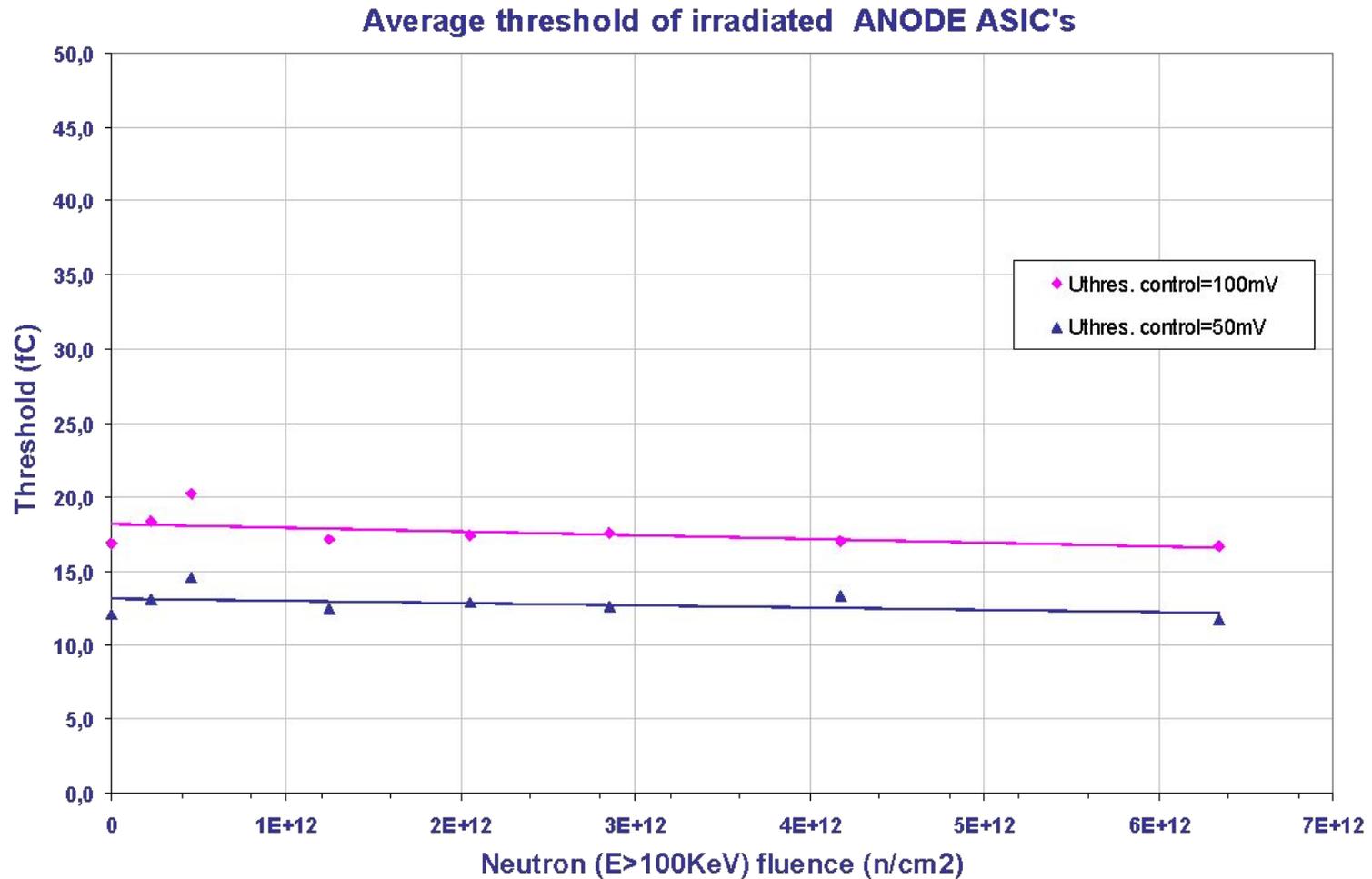
Зависимость длительности выходного импульса от интегрального потока нейтронов

Результаты радиационных испытаний



Зависимость среднего значения коэффициента преобразования усилителя от интегрального потока нейтронов

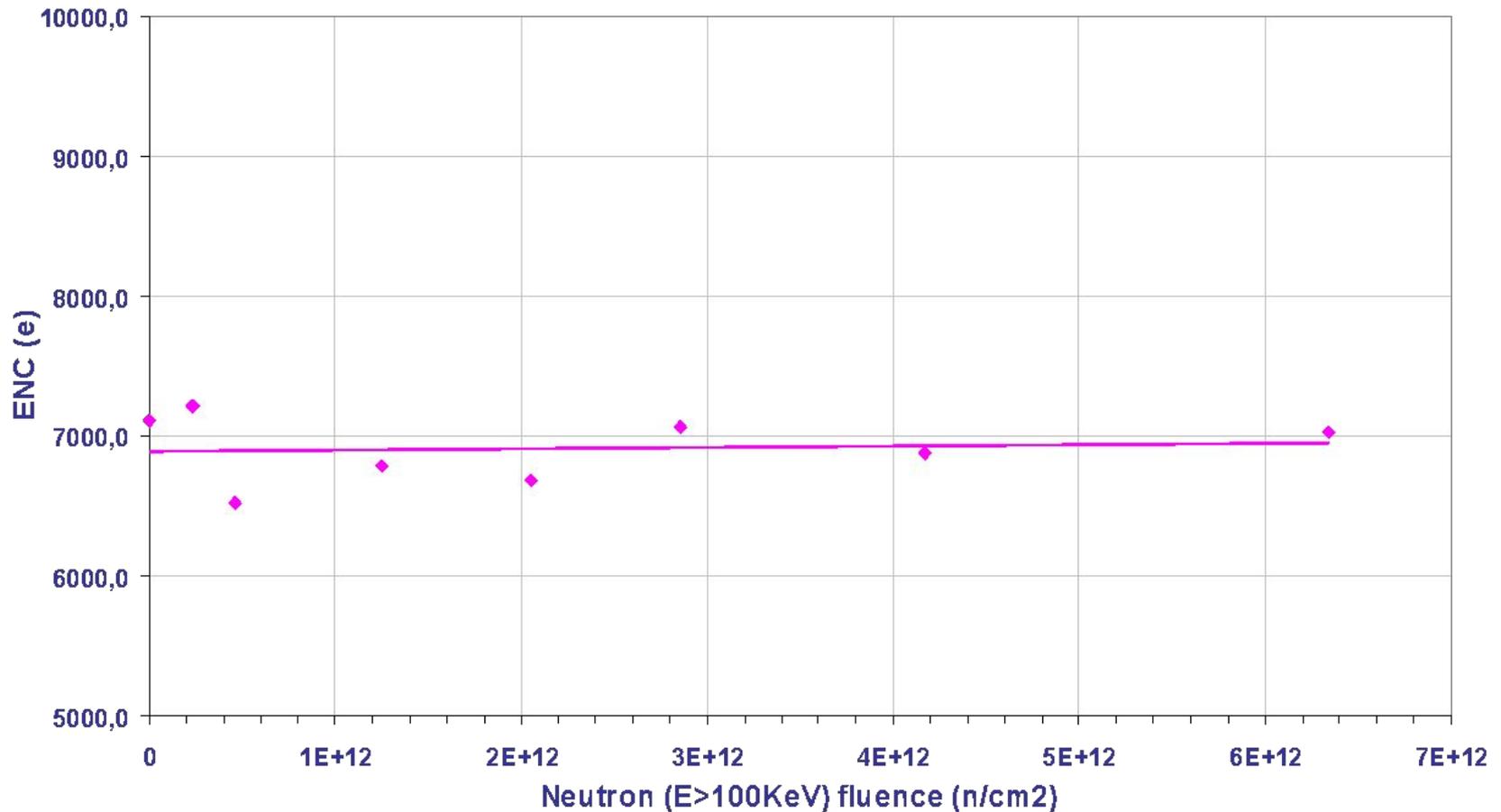
Результаты радиационных испытаний



Зависимость порога срабатывания дискриминатора от интегрального потока нейтронов

Результаты радиационных испытаний

Average ENC of irradiated ANODE ASIC's

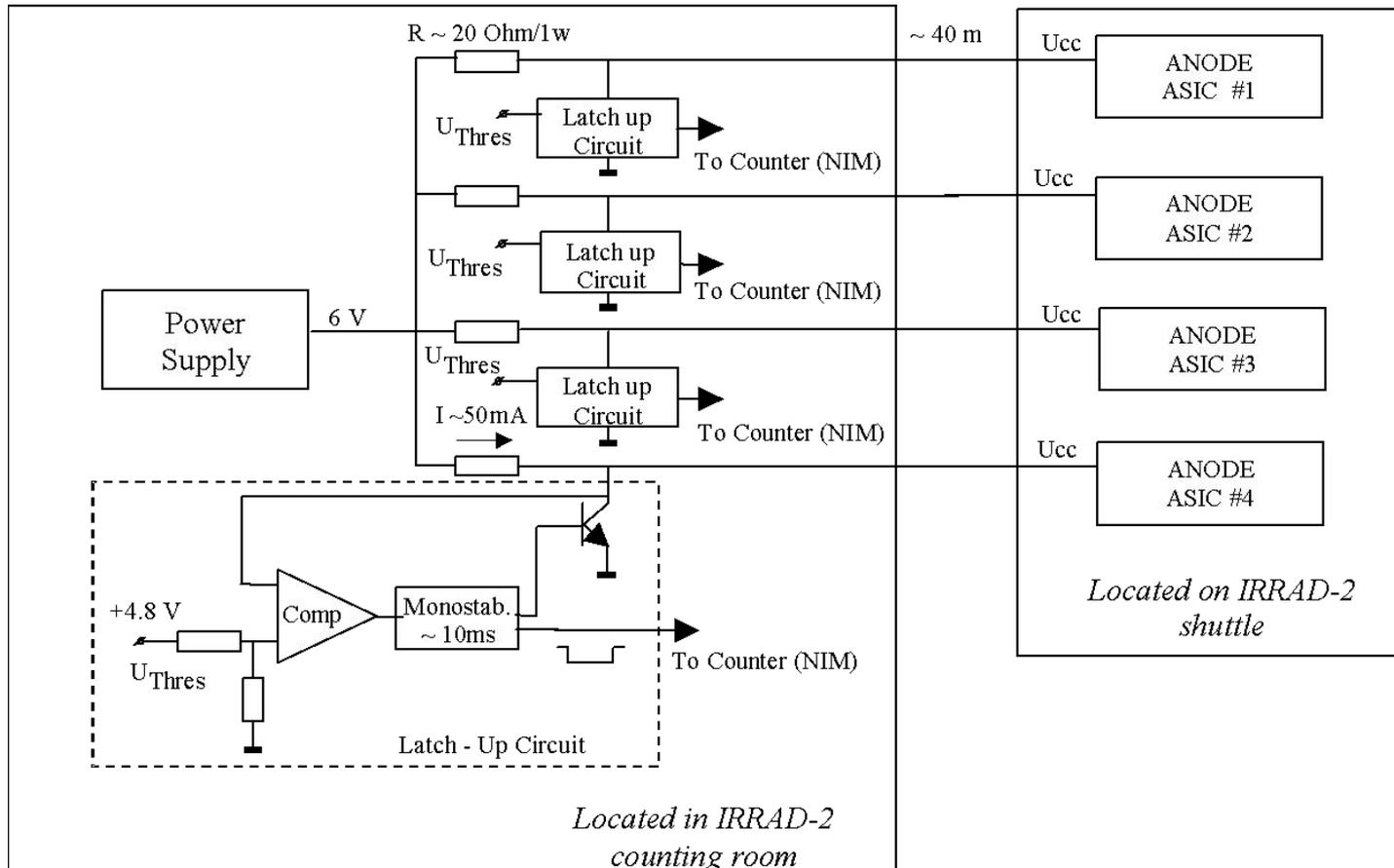


Зависимость шумов от интегрального потока нейтронов

Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией $E_n > 20$ МэВ

Схема проведения эксперимента



Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией $E_n > 20$ МэВ Исследование эффекта «защелкивания» (*SEL*)

Назначение схемы - защита ИС по току. Порог компаратора подбирался таким образом, чтобы при превышении заданной величины тока источника питания ток потребления ИС ограничивался на время срабатывания одновибратора $T \sim 10$ мс. Сигнал с выхода одновибратора подавался на счетчик, контролируемый в процессе облучения.

Результаты эксперимента показали **отсутствие эффекта «защелкивания»** (*SEL*), вплоть до интегрального потока нейтронов $6 \cdot 10^{11}$ н/см² с энергией $E_n > 20$ МэВ.

Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией $E_n > 20$ МэВ

Исследование кратковременных сбоев (*SEU*)

Регистрация событий проводилась с каждого канала облучаемой ИС в течение 5 часов. На рисунке представлена зависимость среднего значения сечения σ_{seu} для 4-х облученных ИС (32 канала) от величины интегрального потока нейтронов при значении порога дискриминатора, равного $Tresh = 18$ фК (100 мВ).

$$\sigma_{seu} = N_{seu} / F_n,$$

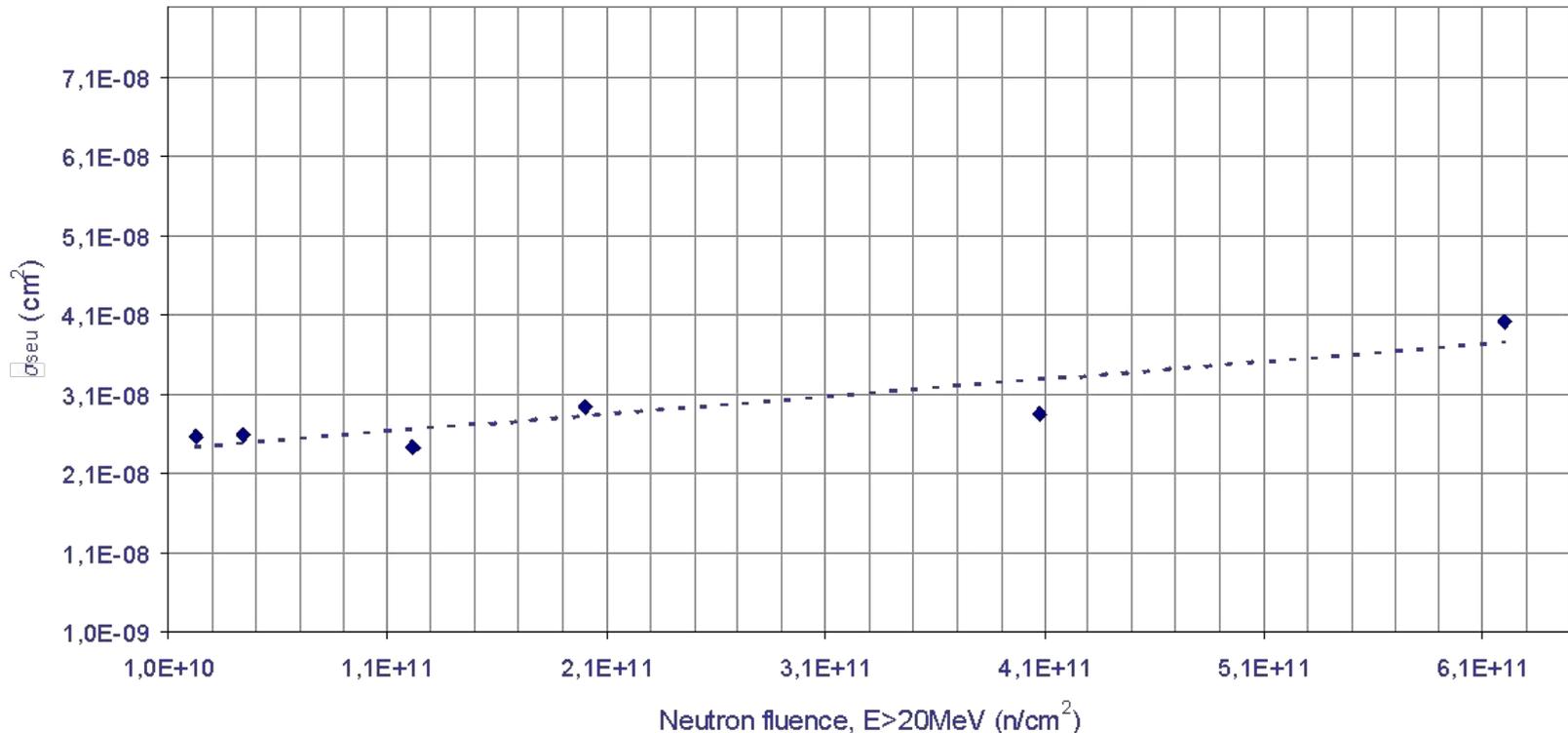
где N_{seu} - количество зарегистрированных *SEU*- событий,
 F_n - интегральный поток нейтронов.

Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией $E_n > 20$ МэВ

Исследование кратковременных сбоев (*SEU*)

Mean value of SEU cross-section of 4 ANODE ASIC's as a function of neutron fluence

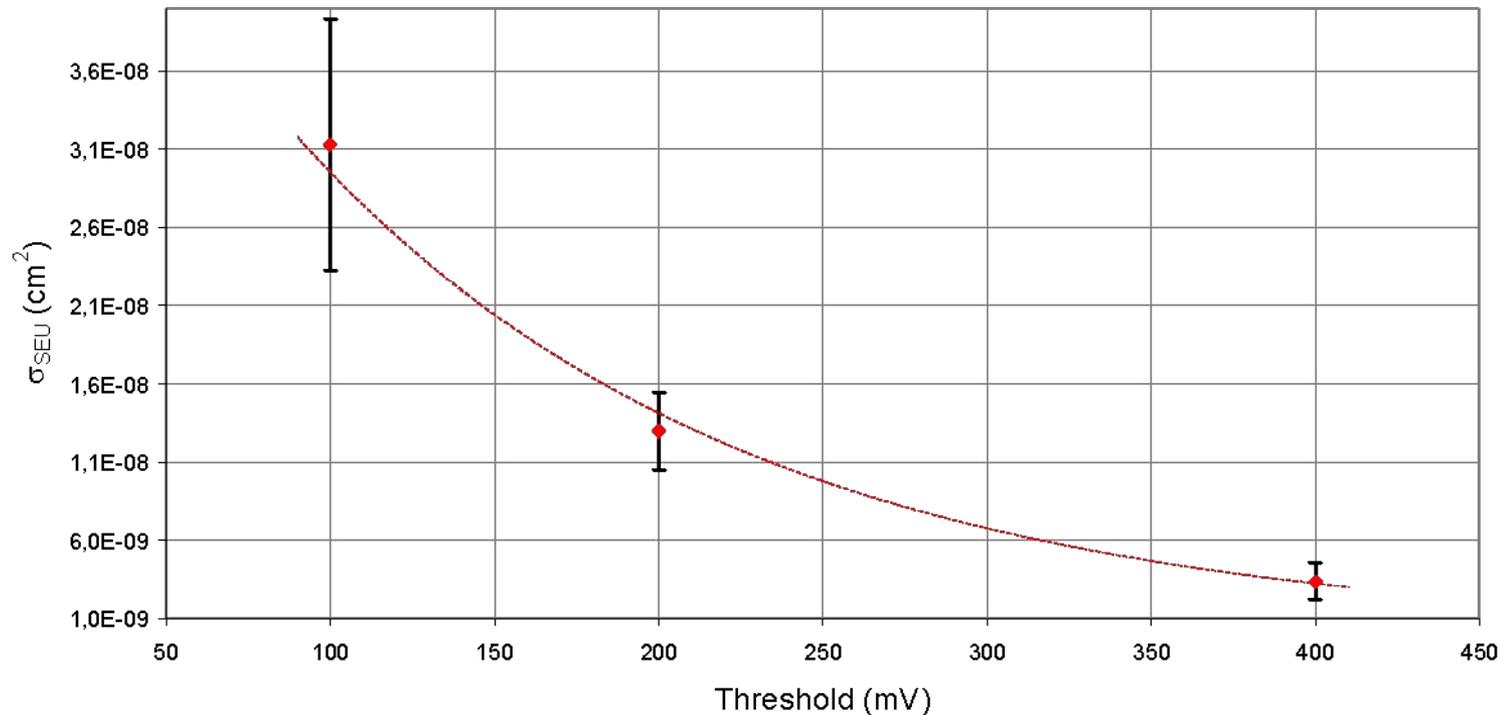


Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией $E_n > 20$ МэВ

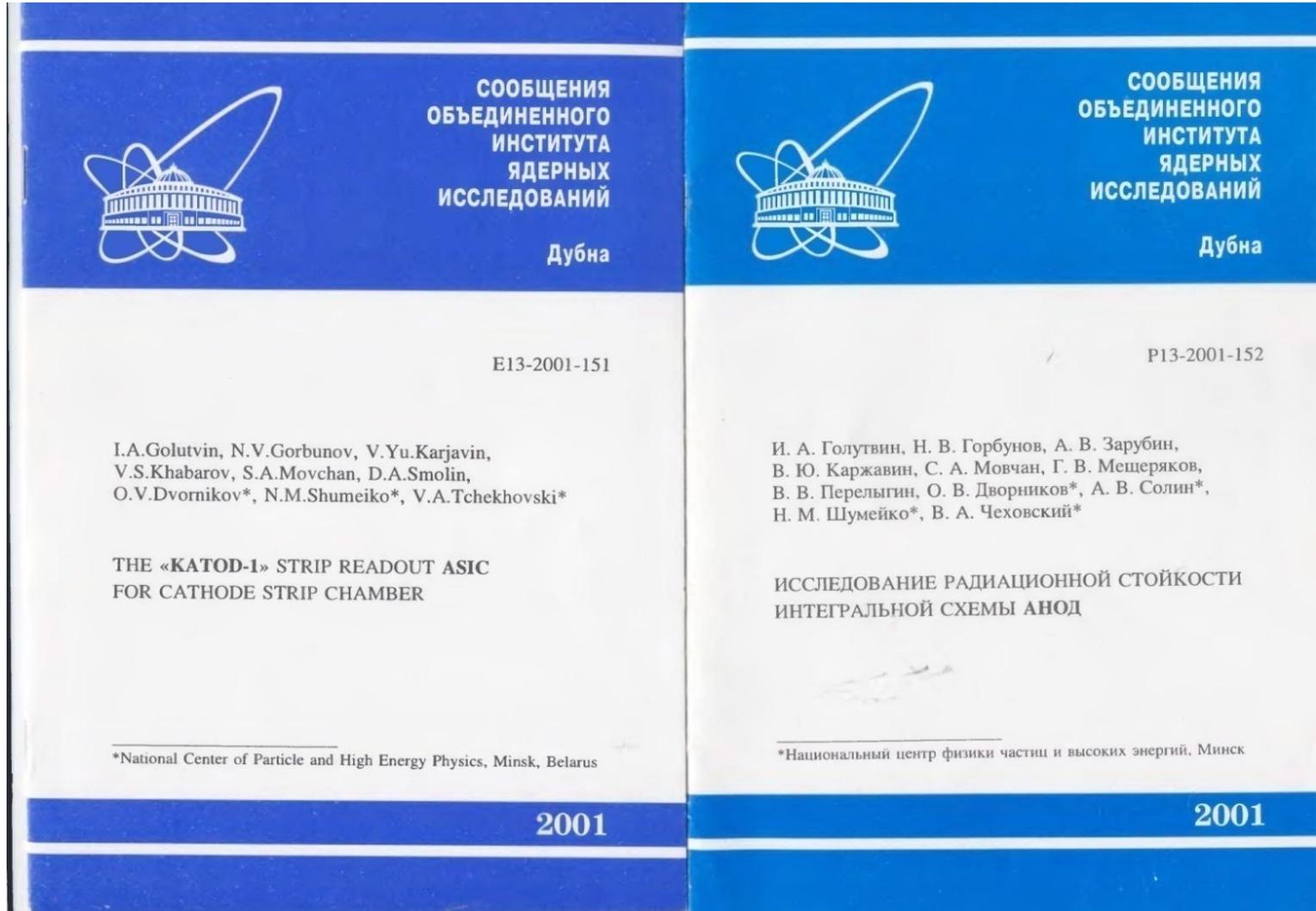
Зависимость среднего значения сечения *SEU*-эффекта от напряжения управления порогом дискриминатора

SEU cross-section of ANODE ASIC as a function of discriminator threshold



Результаты радиационных испытаний

Подробная методика и результаты опубликованы



Основные направления работ

Основные направления работ при создании радиационно-стойких микросхем:

- **разработка комбинированных моделей, адекватно описывающих радиационное изменение параметров интегральных элементов;**
- **схемотехнический синтез аналоговых ИС с минимальным изменением характеристик при воздействии проникающей радиации;**
- **совершенствование методик радиационных испытаний.**

Подход к проектированию радиационно-стойких микросхем

При проектировании радиационно-стойких микросхем целесообразно применение следующего подхода:

1. Выявление параметров моделей интегральных элементов, оказывающих наиболее сильное влияние на характеристики аналоговых микросхем.
2. Определение взаимосвязи параметров моделей с конструктивно-технологическими параметрами типовой структуры.
3. Разработка соотношений, связывающих параметры моделей и излучения (вид излучения, энергия, поглощенная доза, интегральный поток частиц) с помощью эмпирических коэффициентов.

Подход к проектированию радиационно-стойких микросхем

При проектировании радиационно-стойких микросхем рекомендуется применение следующего подхода:

4. Разработка методов идентификации основных параметров моделей из измерений и методик радиационного воздействия на элементы и аналоговые компоненты в режимах близких к рабочим.
5. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) облученных интегральных элементов, идентификация основных параметров моделей, корректировка эмпирических коэффициентов для выбранного технологического маршрута изготовления микросхем.

Подход к проектированию радиационно-стойких микросхем

При проектировании радиационно-стойких микросхем рекомендуется применение следующего подхода:

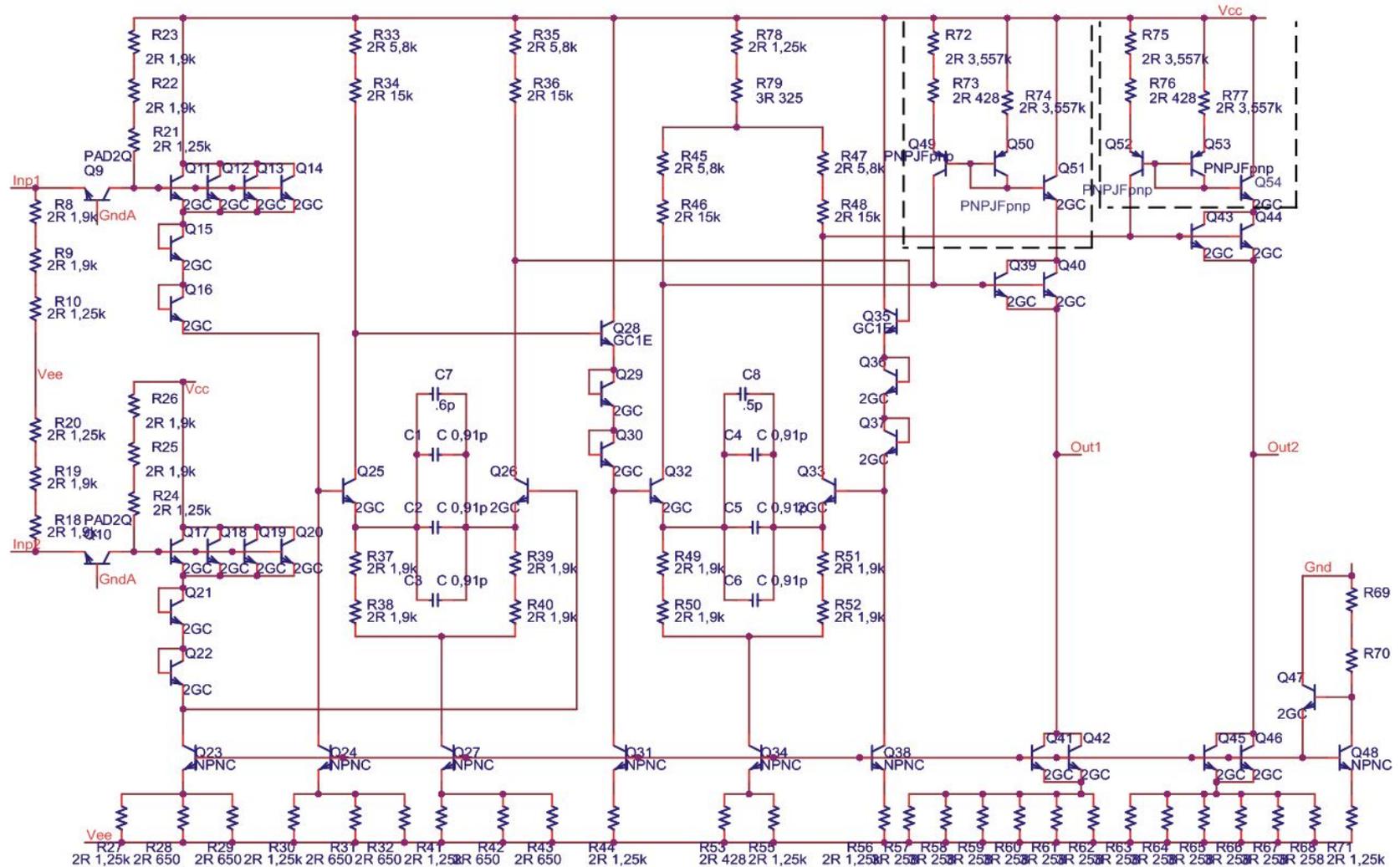
6. Схемотехническое моделирование аналоговых ИС, выявление каскадов наиболее чувствительных к воздействию ПР и их модернизация (введение цепей компенсации входных токов, стабилизация режима работы, уменьшение изменения напряжения смещения нуля, применение новых методов построения сложно-функциональных аналоговых компонентов).
7. Выявление интегральных элементов критически чувствительных к воздействию ПР, их топологическая модернизация или замена на радиационно-стойкие.

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС

Подход к проектированию аналоговых ИС со средним уровнем радиационной стойкости:

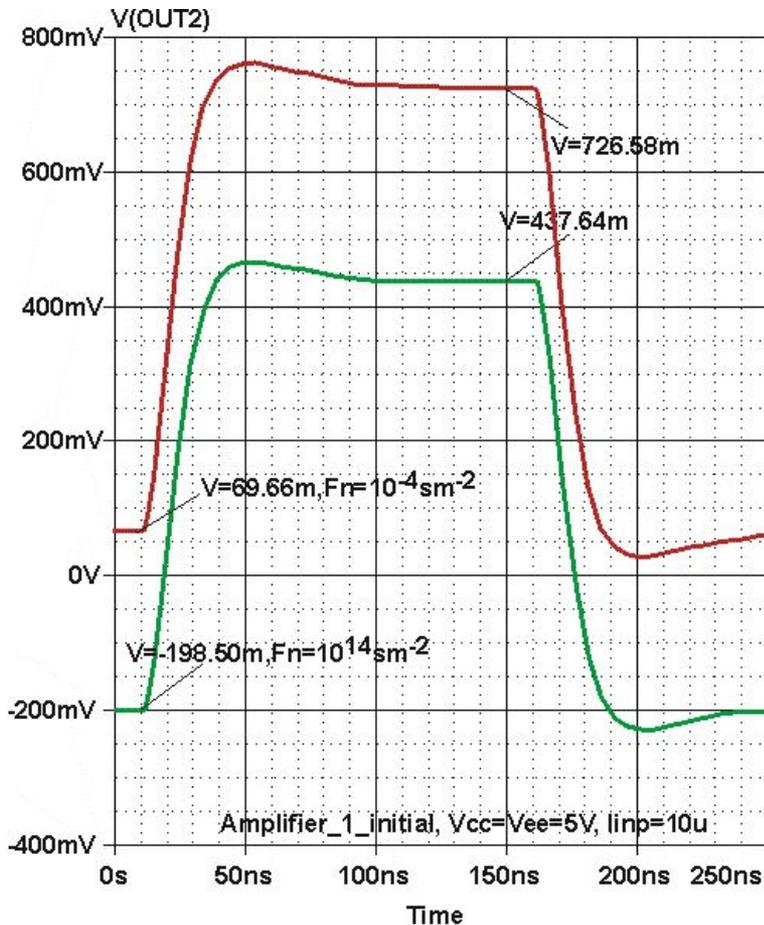
- использование дифференциальной структуры ИС;
- увеличение плотности эмиттерного тока;
- использование горизонтальных *p-n-p*-транзисторов только в источниках тока или в схемах с общей базой (ОБ);
- формирование резисторов на сильнолегированных полупроводниковых слоях;
- схемотехническая модернизация каскадов (введение цепей компенсации входных токов, стабилизация режима работы, уменьшение изменения напряжения смещения нуля).

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС

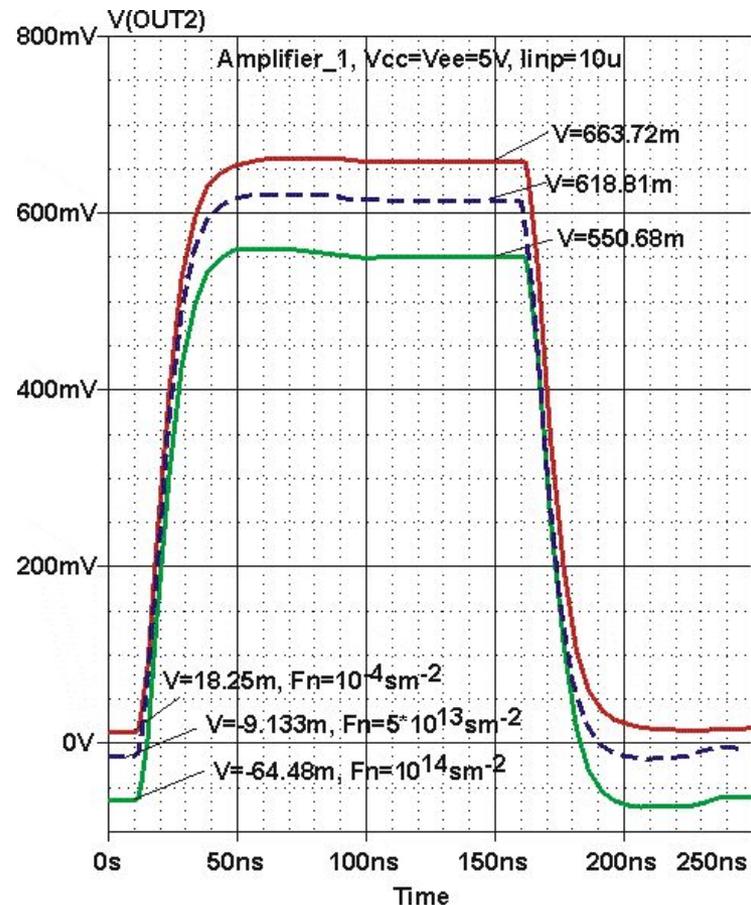


Электрическая схема трансрезистивного усилителя **Amplifier_1**

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



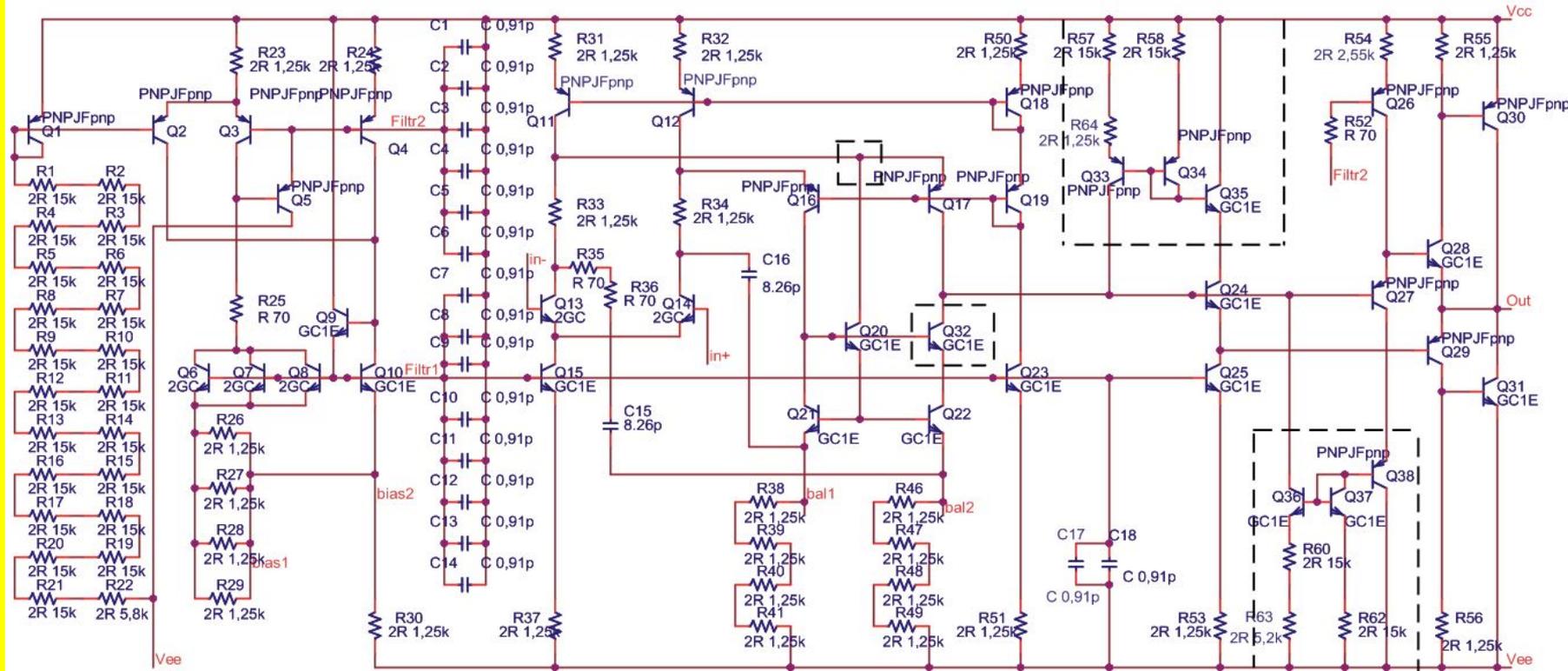
до модернизации



после модернизации

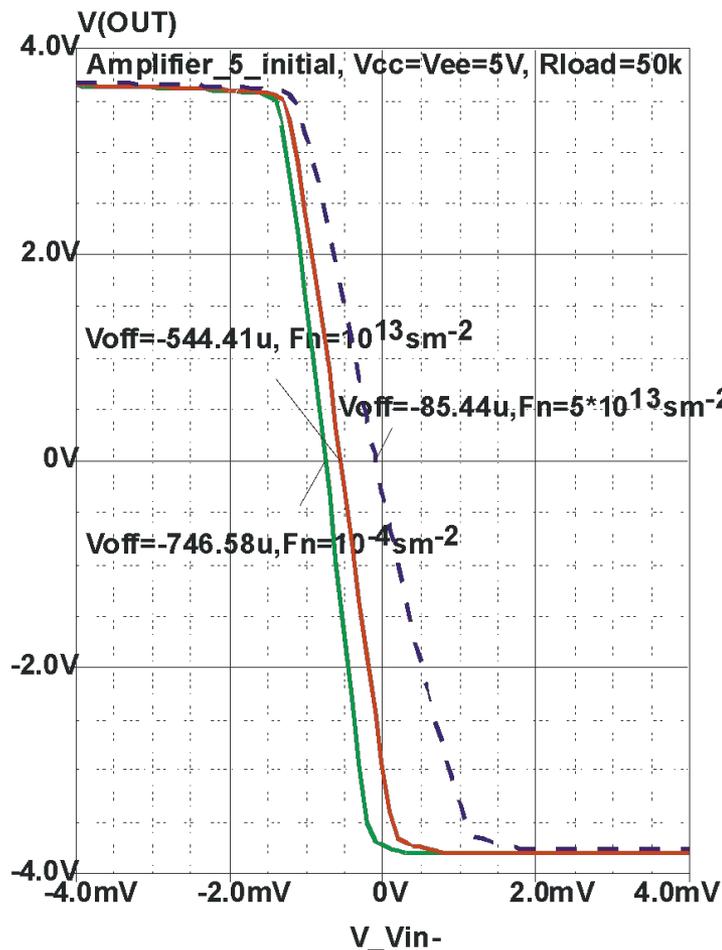
Напряжение на выходе усилителя *Amplifier_1* до и после воздействия потока нейтронов

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС

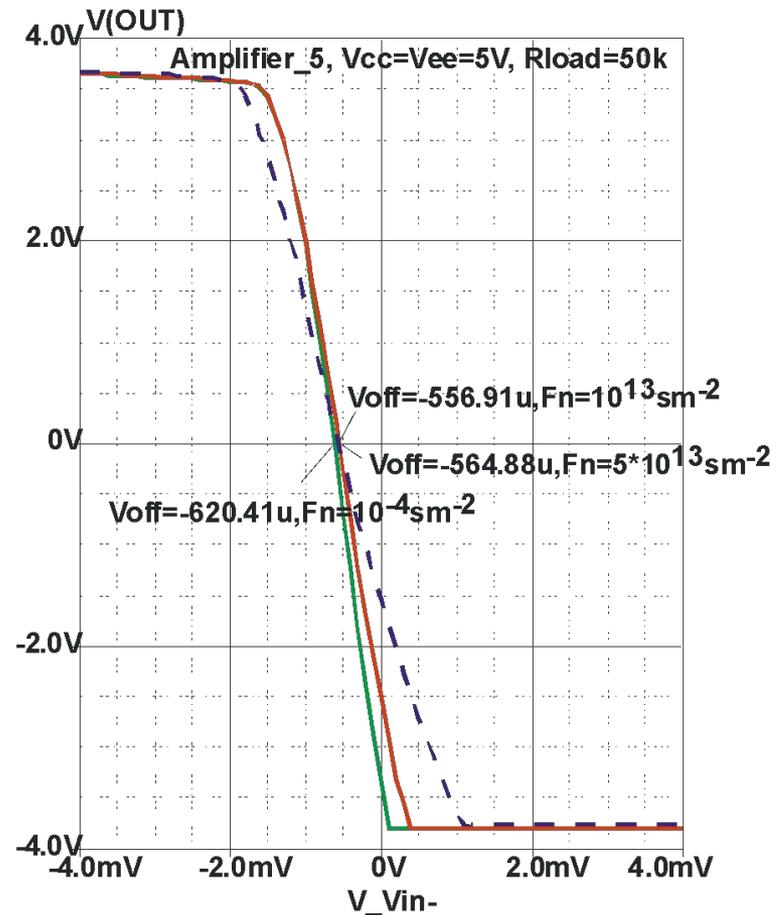


Электрическая схема программируемого операционного усилителя *Amplifier_5*

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



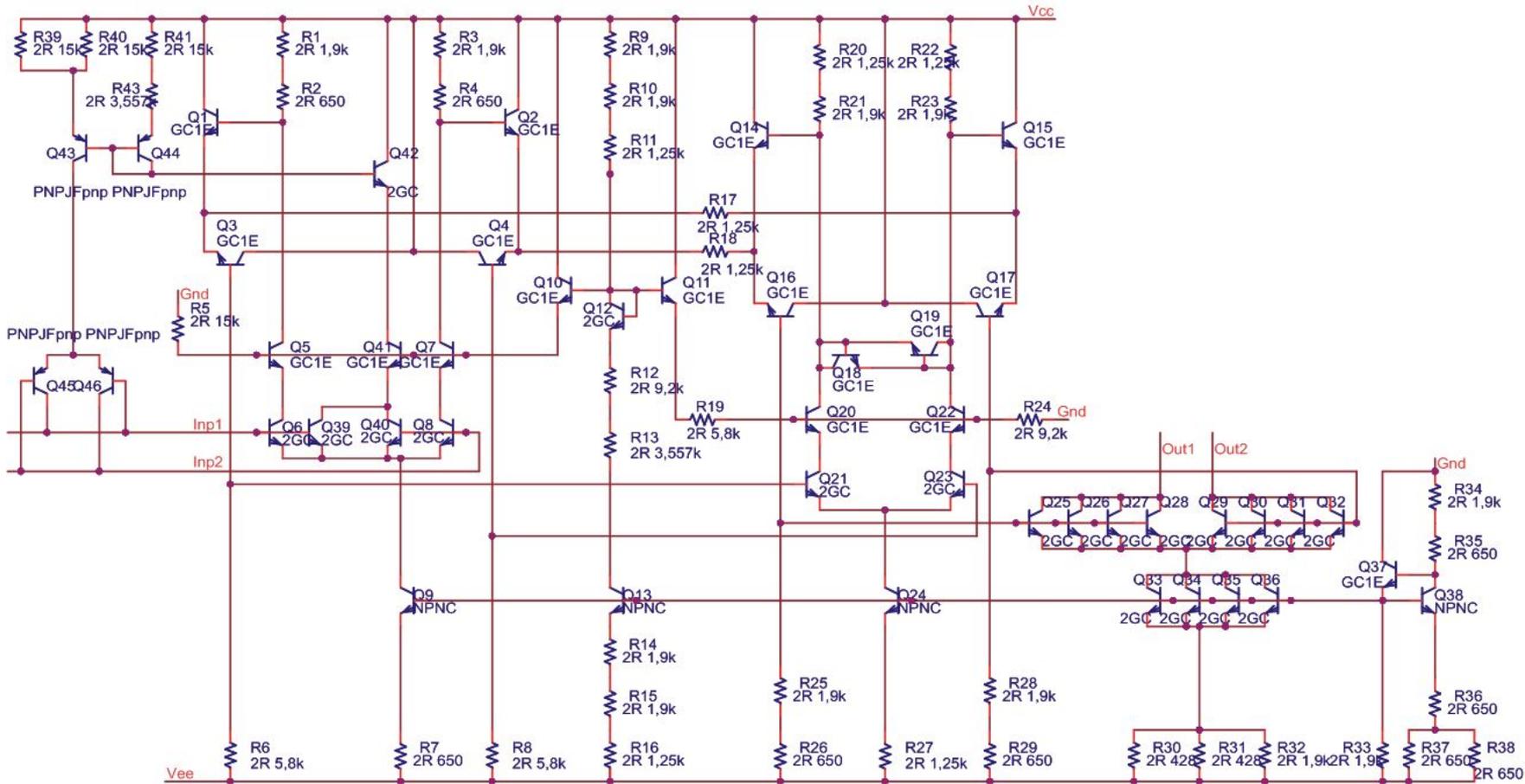
до модернизации



после модернизации

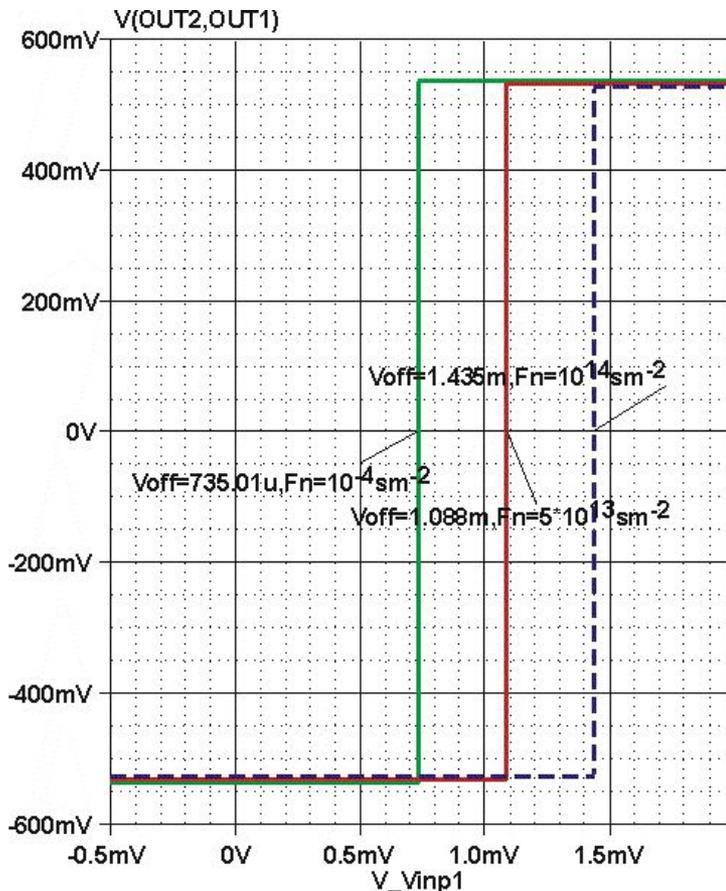
Передаточная характеристика усилителя *Amplifier_5* до и после воздействия потока нейтронов

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



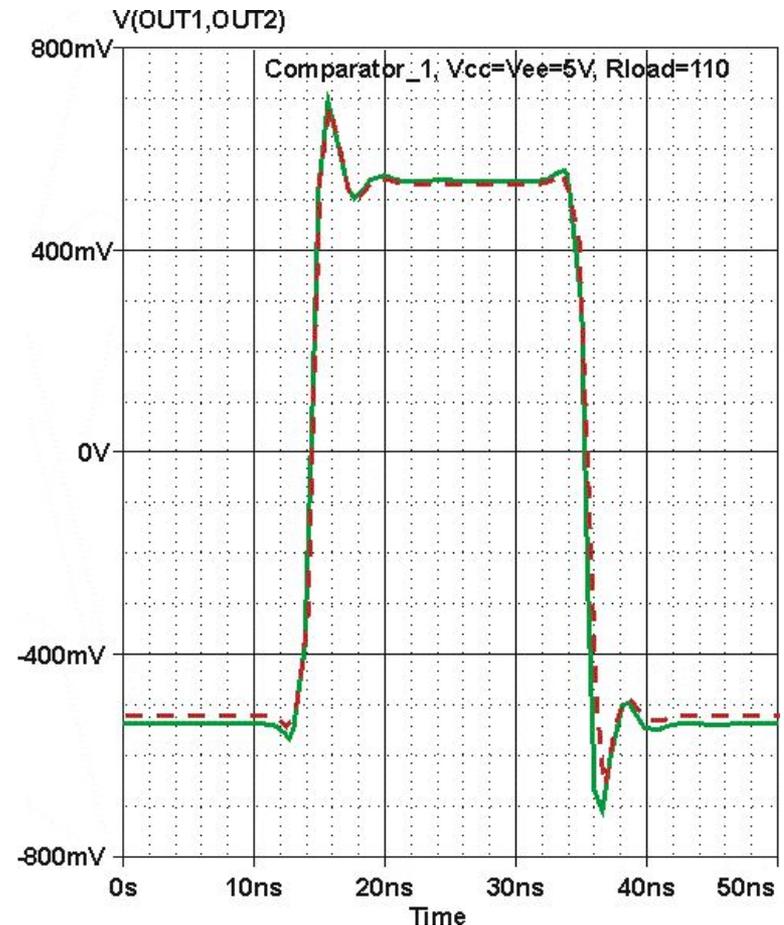
Электрическая схема компаратора *Comparator_1*

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



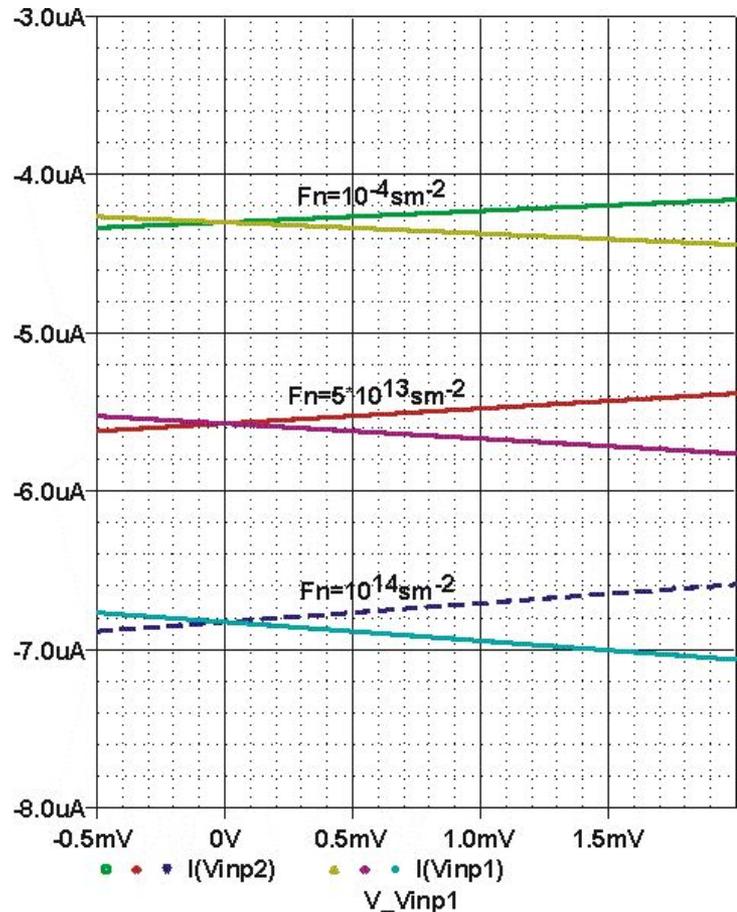
Передаточная характеристика компаратора *Comparator_1* до и после воздействия потока нейтронов

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»

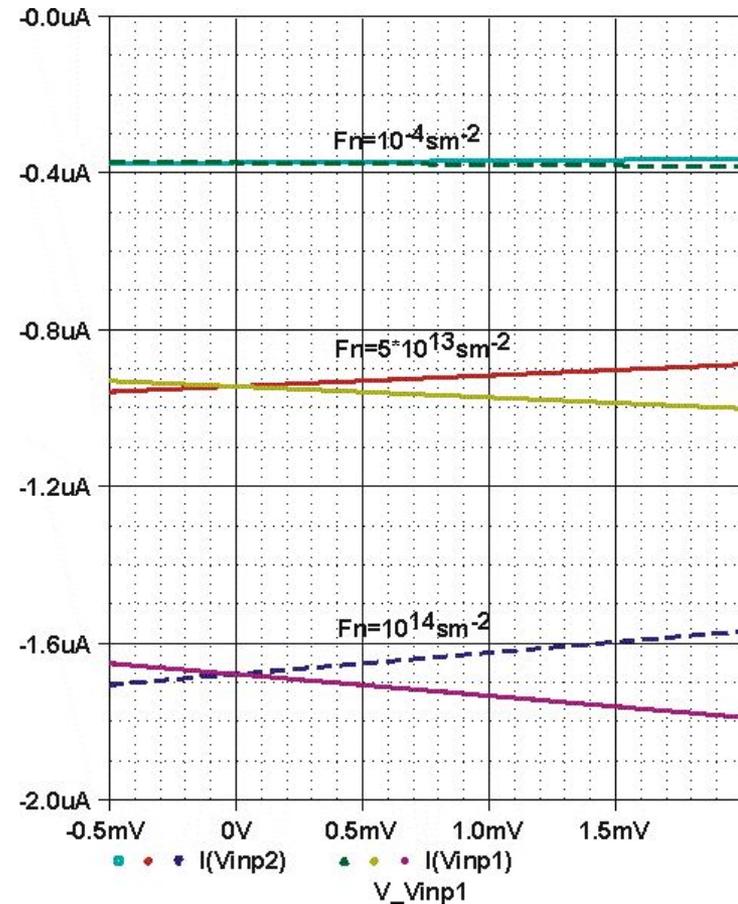


Выходное напряжение компаратора *Comparator_1* до и после (штриховая) воздействия потока нейтронов $F_n = 10^{14} \text{sm}^{-2}$

Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



до модернизации



после модернизации

Входные токи компаратора *Comparator_1* до и после воздействия потока нейтронов

Особенности ОУ с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)

Требования к схемотехнике ОУ с высоким уровнем радиационной стойкости :

1. В качестве критерия качества при схемотехнической синтезе и оптимизации следует выбирать минимальное изменение определяющего параметра ИС при радиационном воздействии (например, для быстродействующего ОУ – скорости нарастания выходного напряжения, для прецизионного – напряжения смещения или уровня шумов).
2. Не применять горизонтальные $Lp-n-p$ -транзисторы для усиления, заменять их p -ПТП.
3. Источники вытекающего тока целесообразно выполнять на p -ПТП, а втекающего – на $n-p-n$ -транзисторах.
4. Для двухкаскадного ОУ входной дифференциальный каскад рекомендуется выполнить на:
 - $n-p-n$ -транзисторах с источником втекающего тока;
 - на p -ПТП с источником вытекающего тока;
 - комбинации $n-p-n$ - и p -ПТП с перекрестными связями (ток дифференциального каскада определяется напряжением затвор-исток p -ПТП).

Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)

5. Промежуточный каскад может быть реализован на:

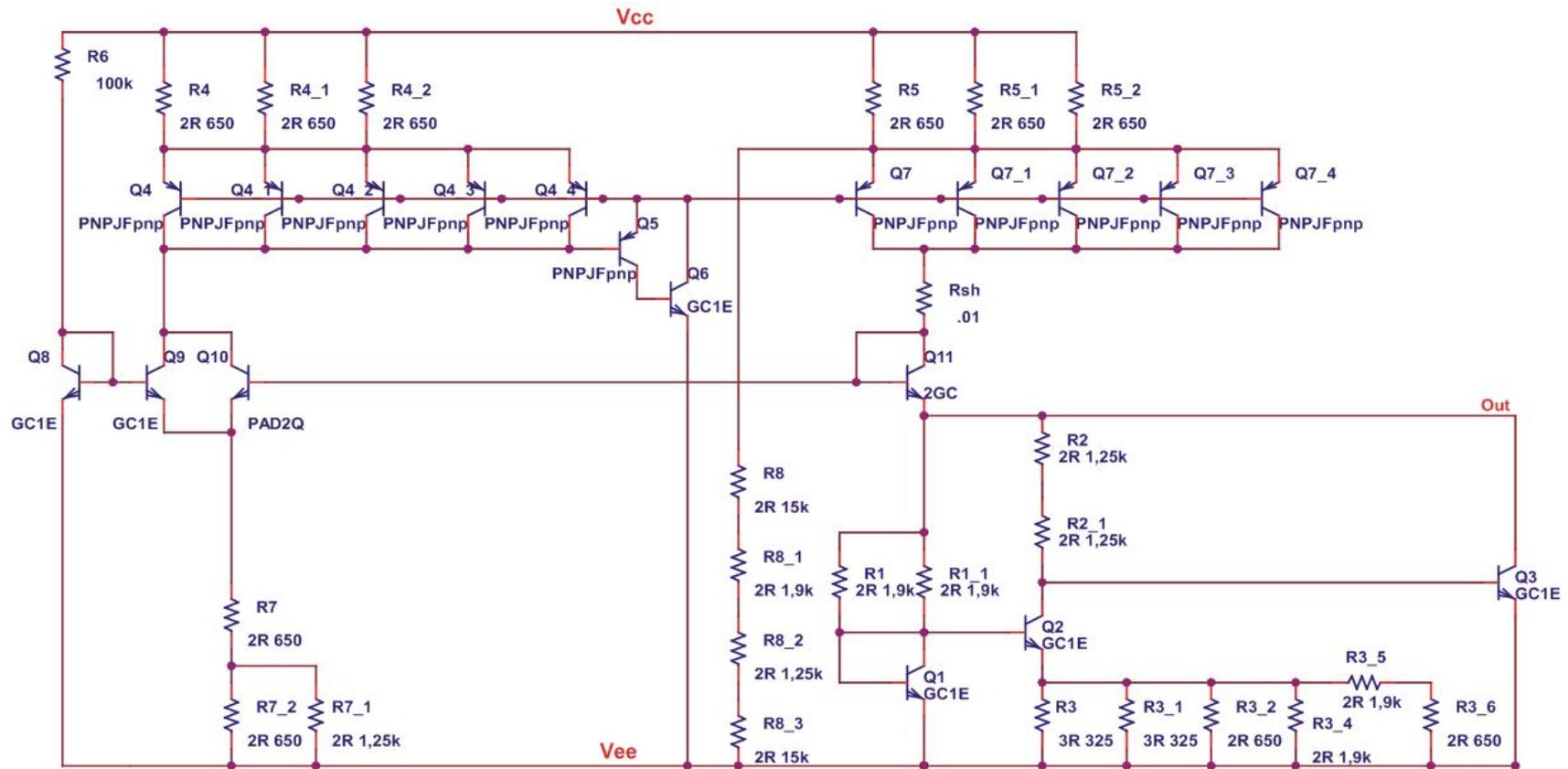
- n - p - n -транзисторах, если дифференциальный каскад выполнен с использованием p -ПТП;
- симметричном "перегнутом каскаде" с использованием p -ПТП;
- на несимметричном "перегнутом каскаде" с использованием p -ПТП.

6. Выходной каскад должен быть выполнен по схеме двухтактного повторителя напряжения с использованием комбинации p -ПТП и n - p - n -транзисторов.

7. При проектировании программируемого ОУ следует выбирать схемную конфигурацию с минимальным количеством источников тока, задающих статический режим, причем желательно, чтобы все источники тока были либо втекающего либо вытекающего тока. Программируемые источники вытекающего тока целесообразно сформировать на p -ПТП или p - n - p -транзисторах, однако необходимо предусмотреть компенсацию деградации их усиления при радиационном воздействии, например, использовать отрицательные обратные связи для стабилизации тока коллектора p - n - p -транзистора.

Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

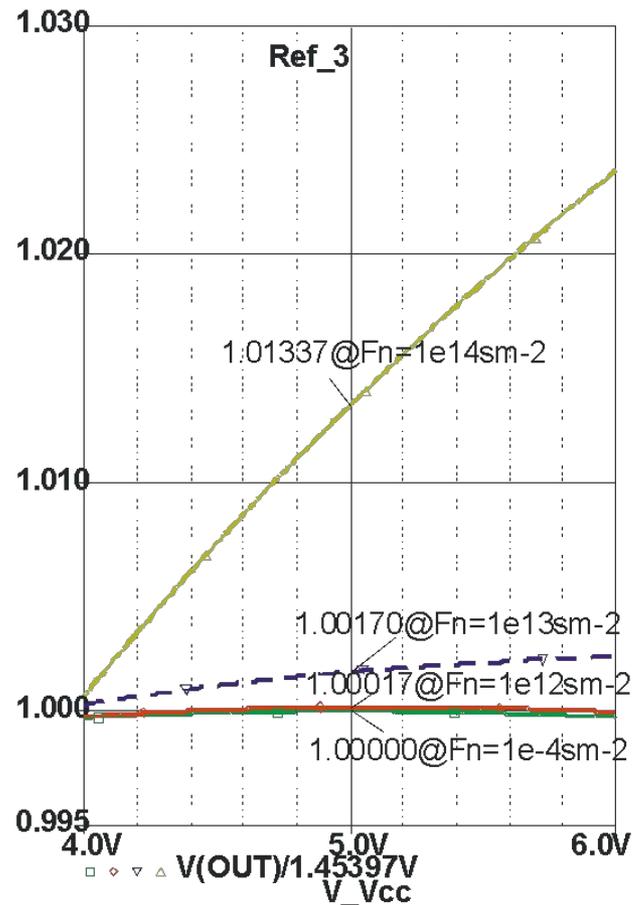
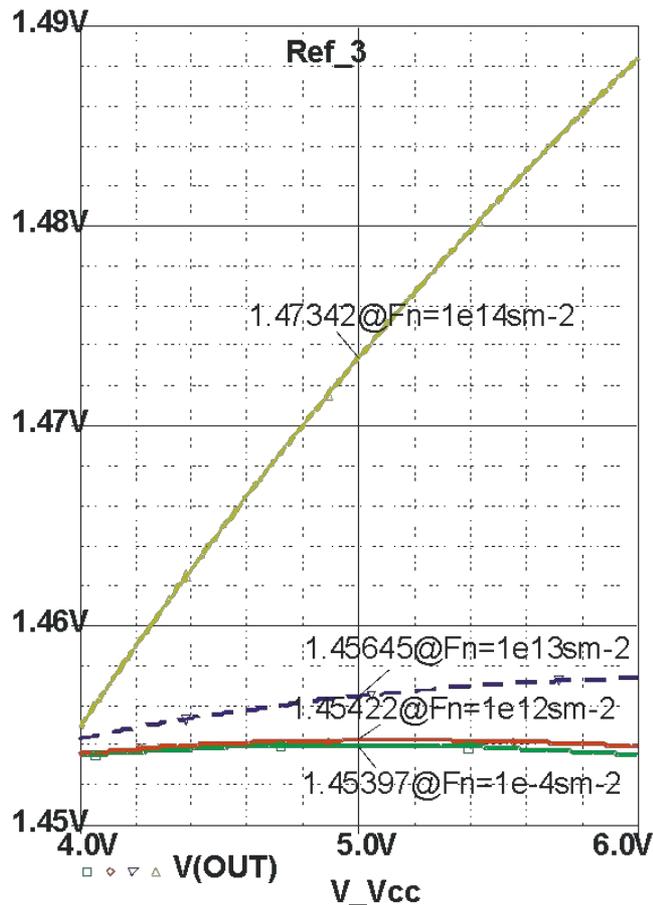
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Электрическая схема источника опорного напряжения *ref_3*

Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

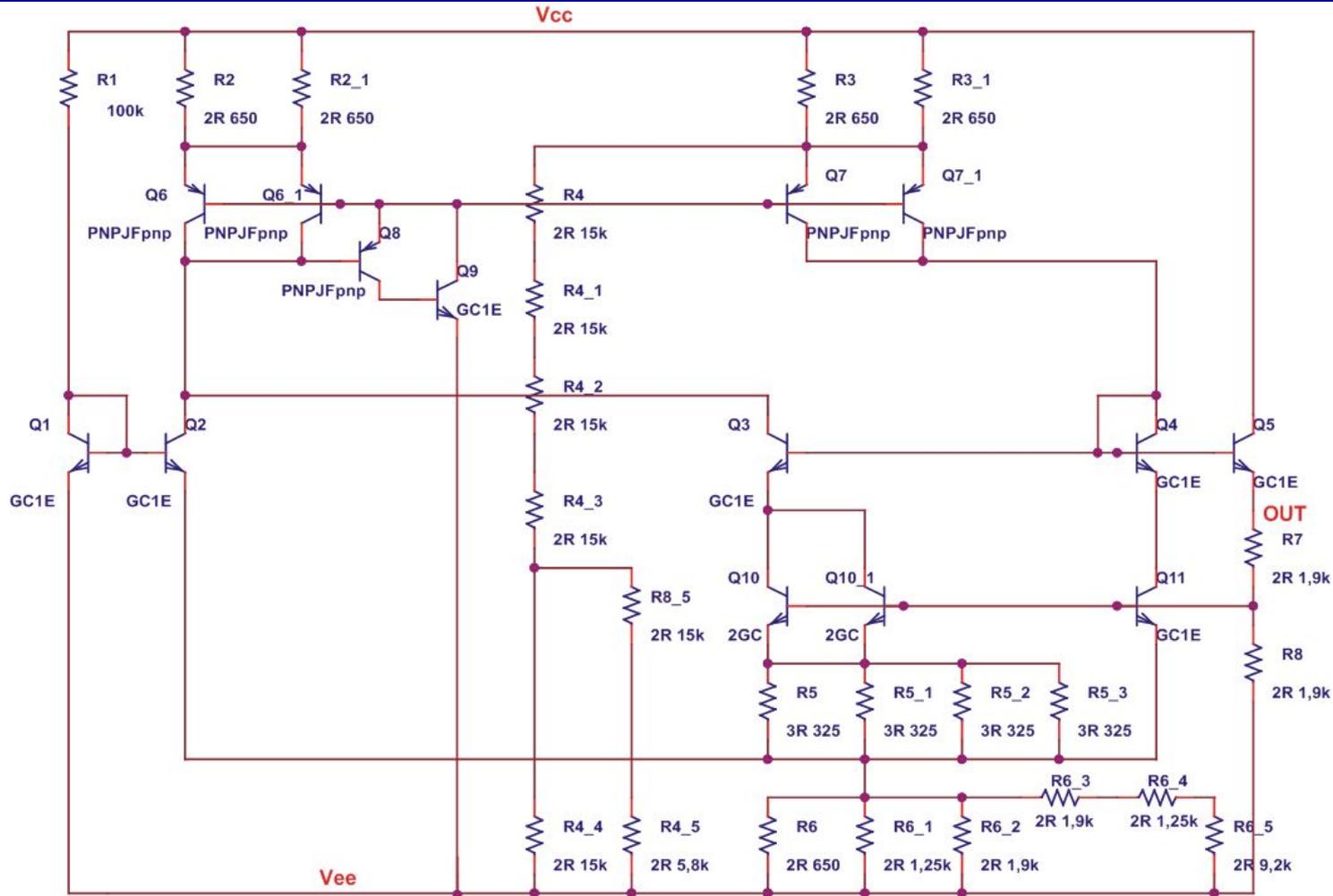
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Выходное и нормированное выходное напряжение ref_3 до и после воздействия потока нейтронов

Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

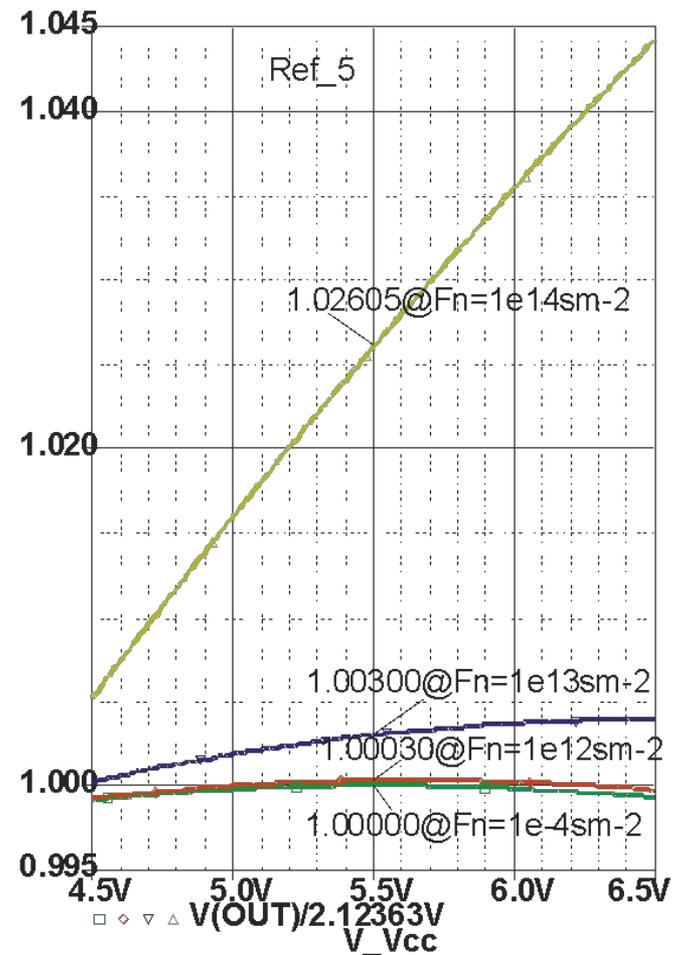
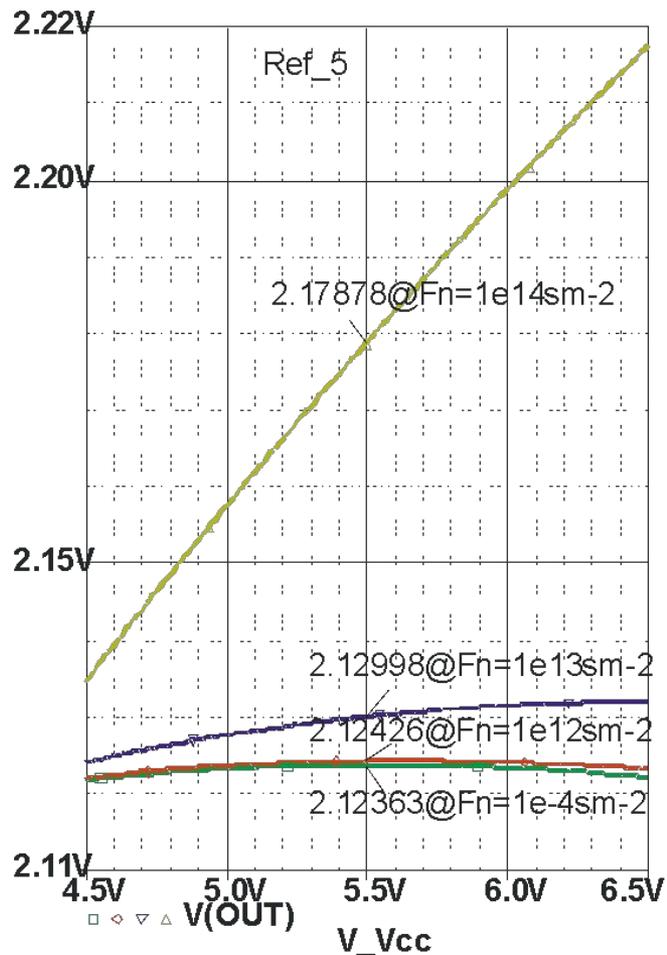
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Электрическая схема источника опорного напряжения *ref_5*

Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

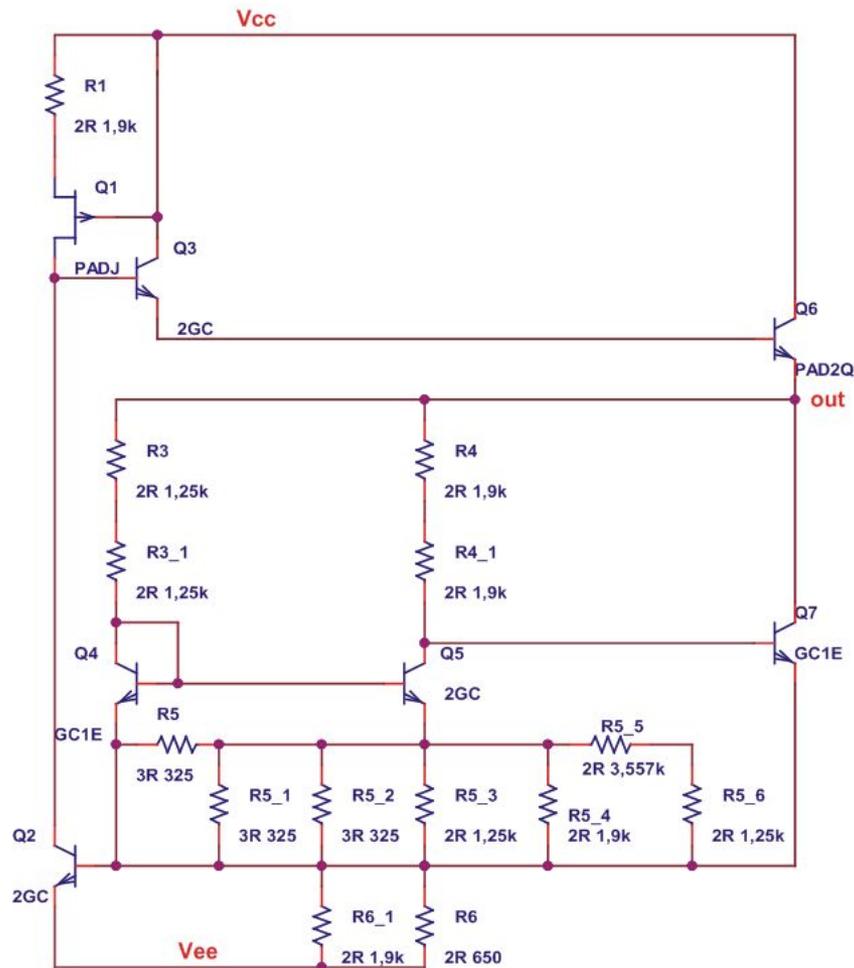
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Выходное и нормированное выходное напряжение ref_5 до и после воздействия потока нейтронов

Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

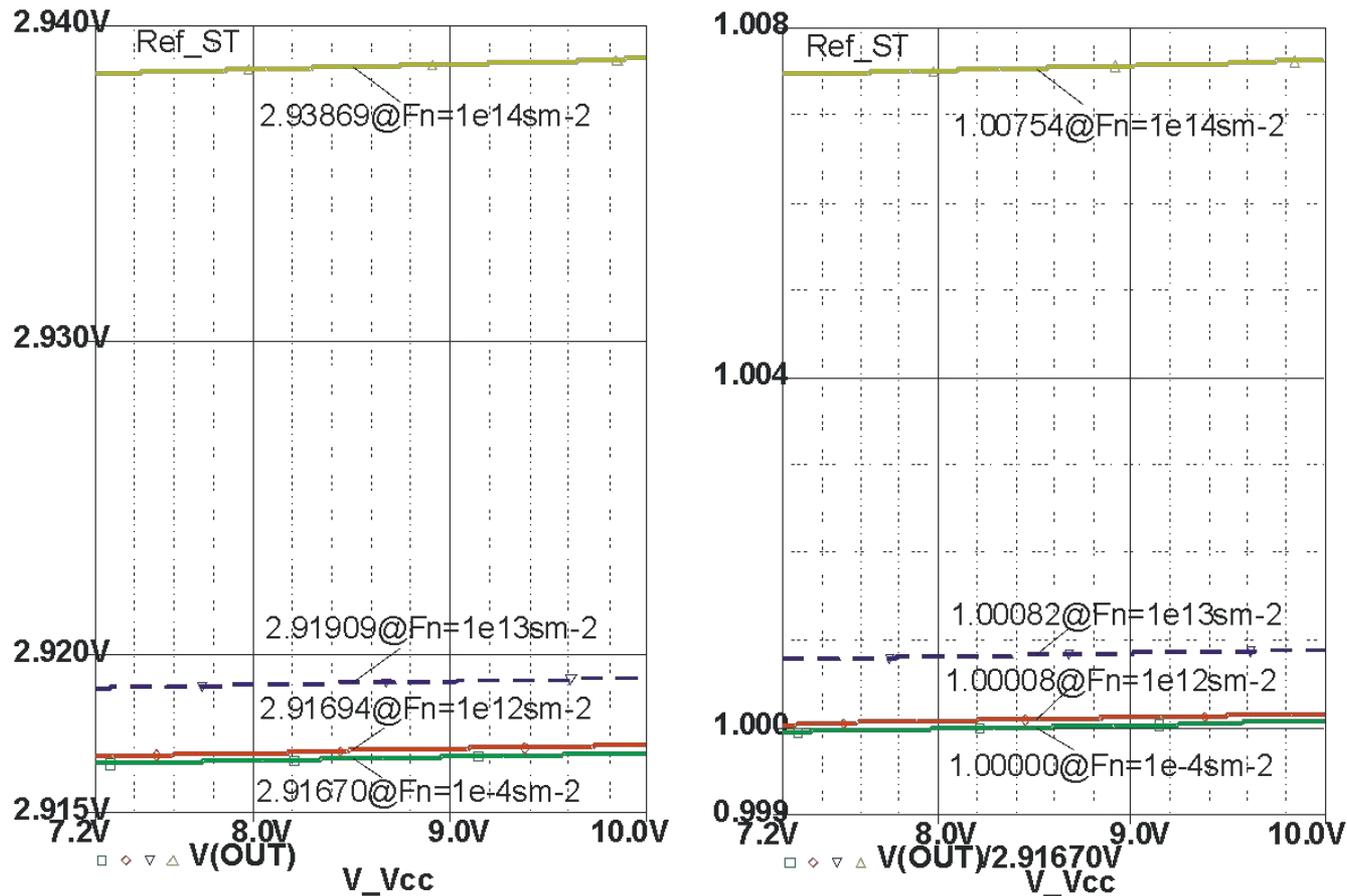
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Электрическая схема источника опорного напряжения *ref_ST*

Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Выходное и нормированное выходное напряжение ref_ST до и после воздействия потока нейтронов

Заключение

1. Для обеспечения производства радиационно-стойких аналоговых микросхем выполнен ряд работ, в том числе:

- модернизирован технологический маршрут изготовления БиПТП ИС;
- создан базовый матричный кристалл «АБМК_1_3»;
- проведены радиационные испытания тестовых транзисторов, резисторов, микросхемы «Тетрод-Б», изготовленных по БиПТП-технологии, на установке ИБР-2, ОИЯИ (г. Дубна, РФ); ИС 8-ми канального усилителя-формирователя-дискриминатора «АНОД» - на установке IRRAD2, CERN (г. Женева, Швейцария).

2. Радиационные испытания позволили установить, что:

- *n-p-n*, *p*-ПТП сохраняют свою работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ н/см², а горизонтальные *p-n-p*- транзисторы - при потоке нейтронов до $9 \cdot 10^{12}$ н/см²;
- примененные конструктивно-схемотехнические решения обеспечили отсутствие в ИС «АНОД» эффекта «защелкивания», вплоть до интегрального потока нейтронов $6 \cdot 10^{11}$ н/см² с энергией $E_n > 20$ МэВ.

Заключение

3. Сформулирован и реализован комплексный подход к проектированию радиационно-стойких микросхем:

- описано влияние проникающей радиации на характеристики интегральных элементов в “*Spice*-подобных” программах, которое проверено при моделировании ВАХ элементов «АБМК_1_3»;
- разработаны требования к синтезу аналоговых ИС со средним уровнем и ОУ с высоким уровнем радиационной стойкости;
- уточнены методики дистанционного контроля работоспособности аналоговых ИС, создана экспериментальная установка для измерений ИС при радиационном облучении и методика регистрации одиночных событий, позволяющая отдельно зафиксировать кратковременные сбои и «защелкивания».

4. Для элементов «АБМК_1_3» спроектированы ИС трансрезистивного и операционного усилителей, компаратора, источников опорного напряжения малочувствительные к воздействию потока нейтронов величиной до 10^{13} см⁻².

Особенности радиационных испытаний аналоговых микросхем

О.В. Дворников

**д.т.н., доц. (ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн",
г. Минск, Беларусь)**

oleg_dvornikov@tut.by



Совершенствование методик радиационных испытаний

Контроль функционирования ОУ при облучении

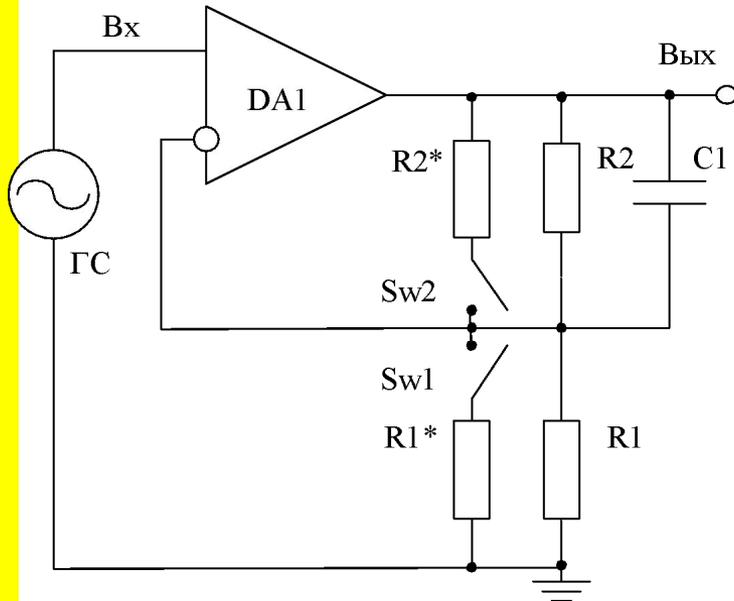
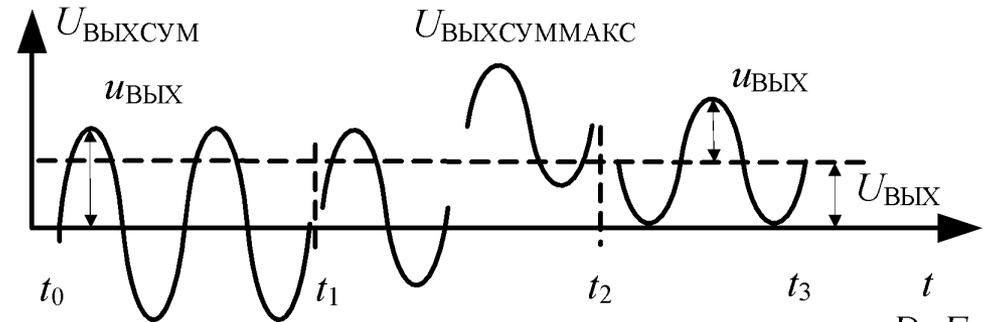


Схема включения ОУ в режиме усиления напряжения



Возможное изменение выходного сигнала ОУ при радиационном воздействии и $U_{ВХ} = 0$, D, F

$$u_{ВХ} = const$$

$$U_{ВЫХ} \approx U_{СМ} \frac{R_2}{R_1} + I_{ВХ} R_2,$$

$$u_{ВХ} \approx u_{ВЫХ} \left(\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{K_{ОУ}} \right),$$

$$\frac{R_1 K_{ОУ2}}{R_2} = \frac{1}{\frac{u_{ВЫХ1}}{u_{ВЫХ2}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1 K_{ОУ1}} \right) - 1}.$$

Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Контроль функционирования компаратора при облучении

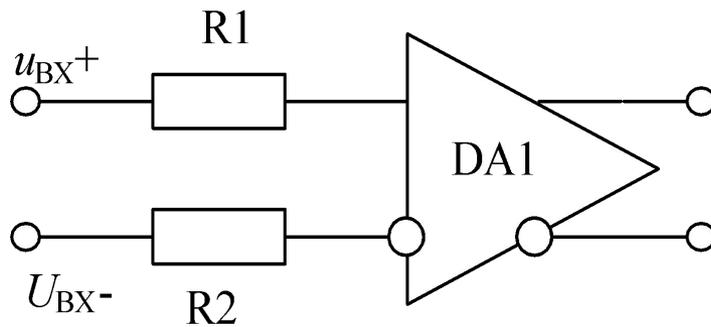
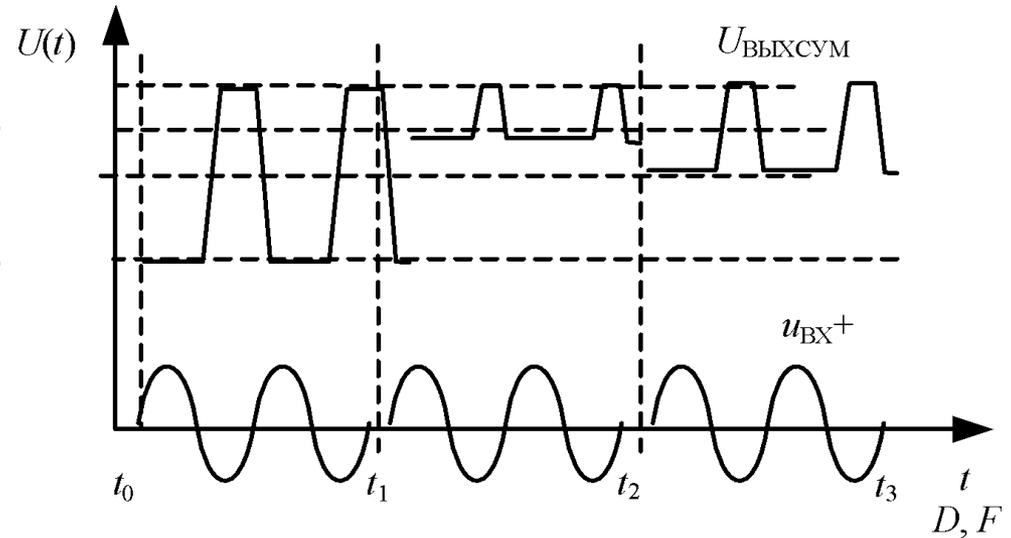


Схема включения компаратора напряжения



Возможное изменение выходного сигнала компаратора при радиационном воздействии

Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Регистрация одиночных событий

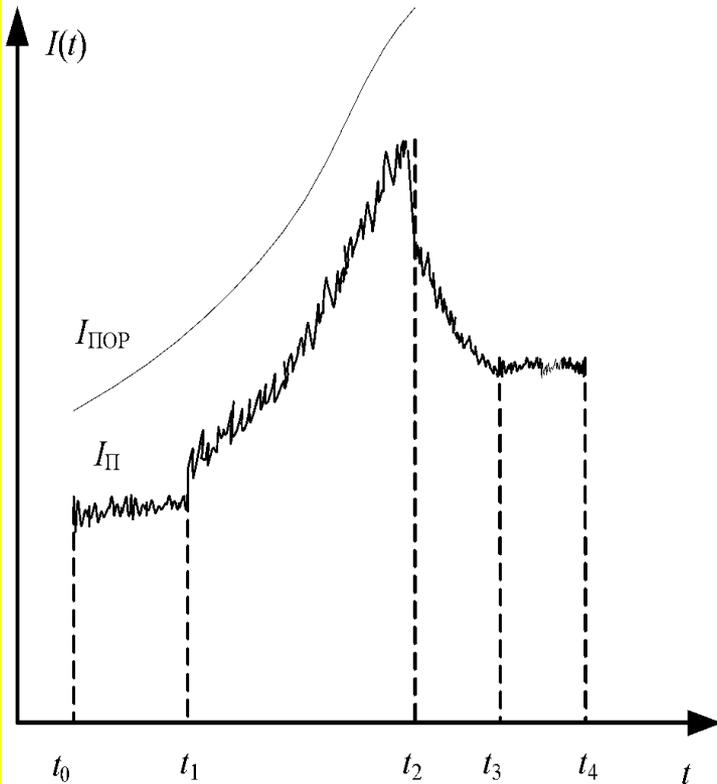
При регистрации одиночных событий (*SEE*-эффекты) необходимо различать тиристорный эффект (*SEL*) и кратковременные сбои (*SEU*).

При *SEU*-эффекте на выходе аналогового устройства появляется «ложный» кратковременный импульс напряжения и происходит изменение тока потребления, но ИС не теряет работоспособность. Для регистрации *SEU*-эффекта рекомендуется считать импульсы выходного напряжения аналогового устройства при постоянном напряжении на его входах.

Инженерный критерий *SEU*-эффекта: *SEU*-событие происходит, если при входном постоянном напряжении на выходе аналогового устройства появляется кратковременный импульс с размахом более 10% типового выходного сигнала.

Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)



Предполагаемое изменение тока потребления $I_{\text{П}}$ и следящего порога $I_{\text{ПОР}}$ при радиационном воздействии

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн"

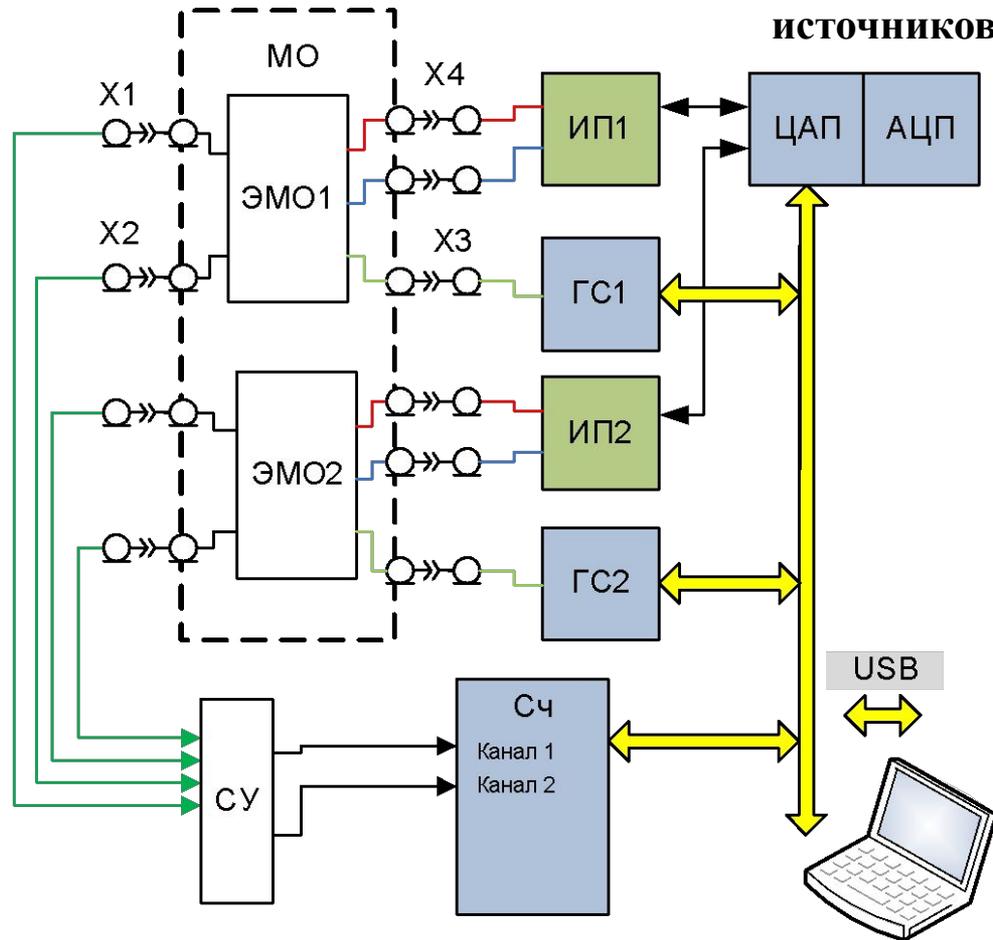
SEL-эффект вызывает значительное и продолжительное увеличение тока потребления и прекращение функционирования ИС, которое может быть устранено только при выключении и повторном включении источников напряжения питания.

При регистрации *SEL*-событий рекомендуется использовать следящий порог: за оговоренное количество периодов входного синусоидального напряжения определяется среднеквадратическое значение тока потребления ($I_{\text{ПСКЗ}}$) и устанавливается величина порогового тока ($I_{\text{ПОР}}$), при превышении которого источники напряжения питания автоматически отключаются и находятся в выключенном состоянии до повторного включения (перезапуска). Каждый перезапуск источников напряжения питания рассматривается как *SEL*-событие. $I_{\text{ПОР}} = (1,5...2)I_{\text{ПСКЗ}}$.

Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Блок-схема установки для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий при использовании радионуклидных (не импульсных)



МО - Модуль основной

ЭМО – электронный модуль с образцом

СУ - согласующее устройство

ГС – генератор сигналов произвольной формы

ИП – источник питающих уровней

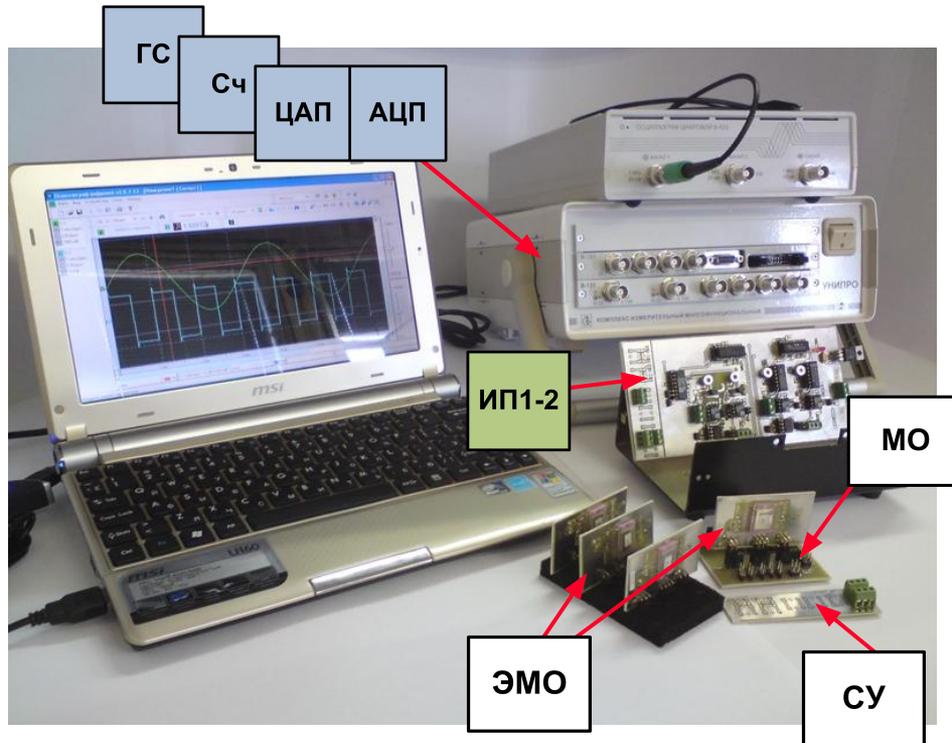
Сч – счетчик импульсов

X – электрические разъемы

Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Установка для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий



Стандартное оборудование:

Осциллограф В-423.

Генератор сигналов произвольной формы В-332 и аналого-цифровой порт В-381 в составе измерительного многофункционального комплекса «УНИПРО»

Специализированное оборудование:

ИП – источник питающих уровней

МО - модуль основной

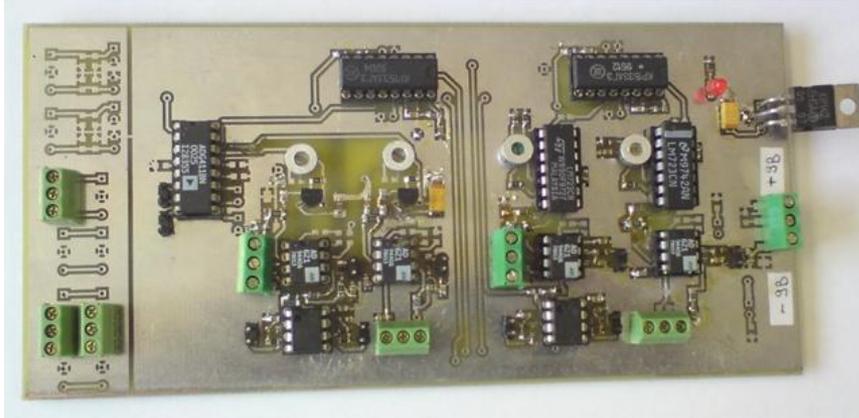
ЭМО – электронный модуль с образцом

СУ - согласующее устройство

Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Специализированное оборудование в составе установки для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий

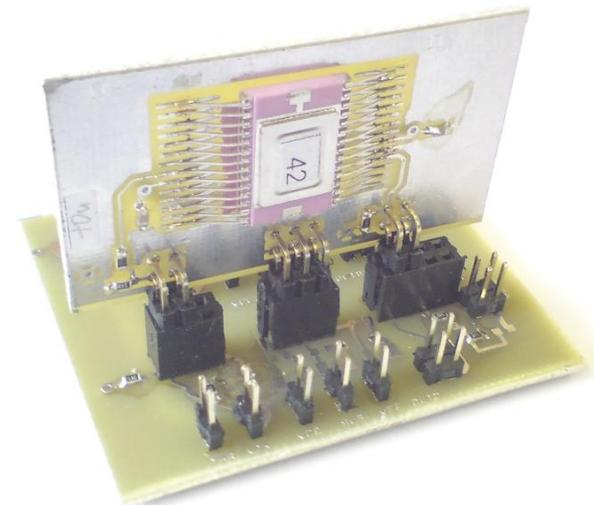


МО + ЭМО:

- Монтаж образца в зоне облучения
- Подключение кабелей для подачи/съема сигналов и уровней питания
- Быстрая замена образцов в зоне облучения
- Унифицированная схема подключения ИС для паспортизации параметров до/во время/после облучения

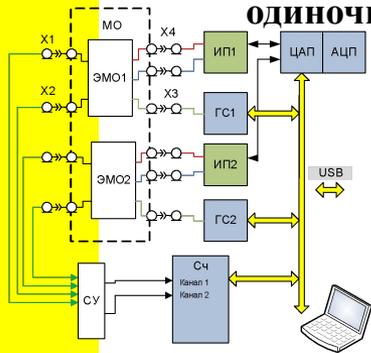
ИЦ:

- Четыре канала (по два положительных и отрицательных уровня)
- Линейный выход в каждом канале для независимого измерения тока потребления
- Регулировка выходного уровня напряжения
- Регулировка уровня срабатывания схемы защиты от «зашелкивания»
- TTL -выход для регистрации момента «зашелкивания»



Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Основные параметры установки для измерений во время облучения и регистрации
одиночных событий при использовании радионуклидных (не импульсных) источников



Количество образцов ИС, находящихся в зоне облучения: **2 шт.**

Максимальная частота регистрации SEE событий: **10 кГц**

Входные сигналы ЭМО:

**импульсное и синусоидальное напряжение
ток потребления образцов (по 4 каналам),
амплитуда (размах), частота и**

Измеряемые параметры:

**коэффициент заполнения выходного
сигнала ЭМО**

Диапазон регулировки выходных уровней питания: **3.5 ÷ 7.0 В (-3.5 ÷ -7.0 В)**

Максимальный выходной ток :

до 100мА/канал

Минимальный порог срабатывания

схемы защиты от «зашелкивания» :

<2мА

Средняя задержка срабатывания схемы защиты :

<2мкс*

Интервал времени между моментом срабатыванием защиты и

повторным включением канала ИП :

40 – 120 мкс (регулируется)

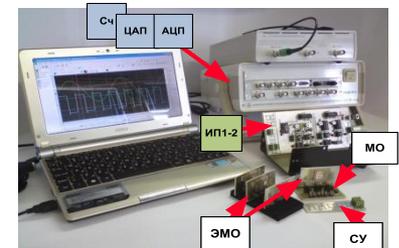
Точность измерения тока потребления, не хуже:

25 мкА

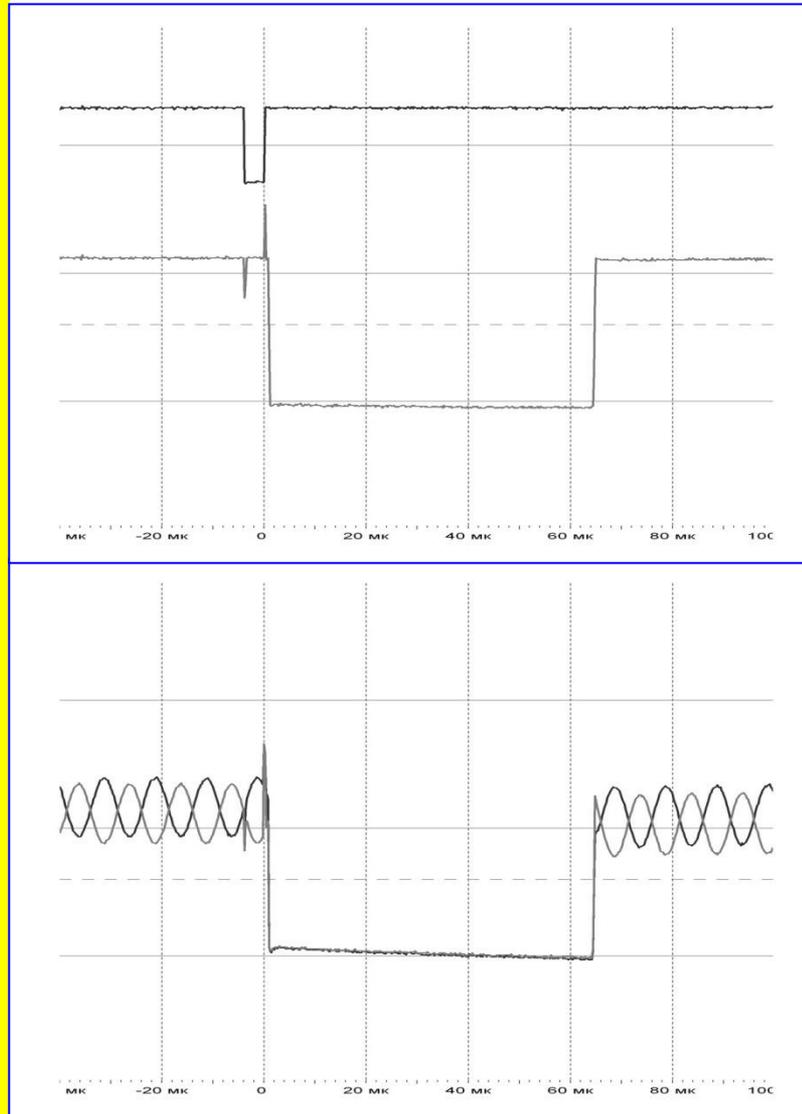
Емкость нагрузки (на канал):

от 10 до 200 нФ

*) при среднем токе потребления 20 мА/канал и емкости нагрузки <20 нФ



Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)



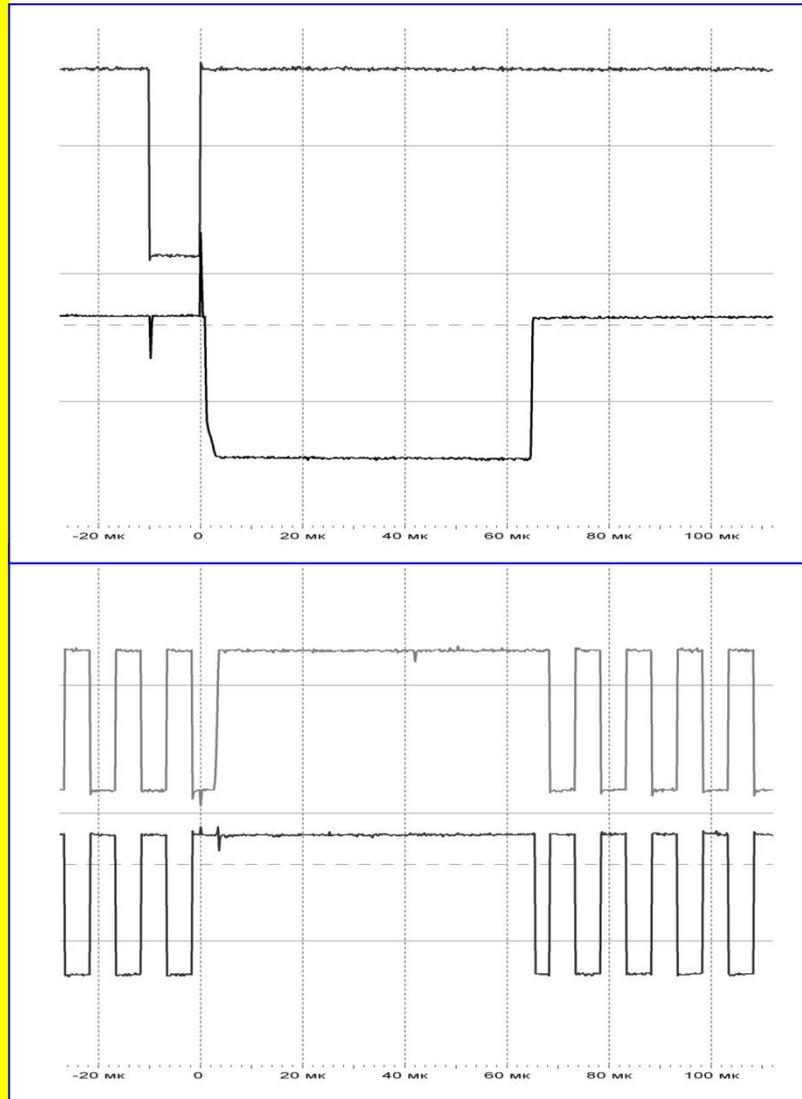
Осциллограммы в основных узлах ИП и ЭМО (с ТИУ Ampl-1.14) (тестовый режим)

Сверху вниз:

- Импульс тока нагрузки при имитации «защелкивания» (масштаб по вертикали 20мА/дел.)
- Напряжение на шине уровня питания V_{cc} (масштаб по вертикали 5В/дел.)
- Форма сигнала на дифференциальном выходе ТИУ Ampl-1.14. (масштаб по вертикали 5В/дел.).

Входной сигнал: синусоидальный

Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)

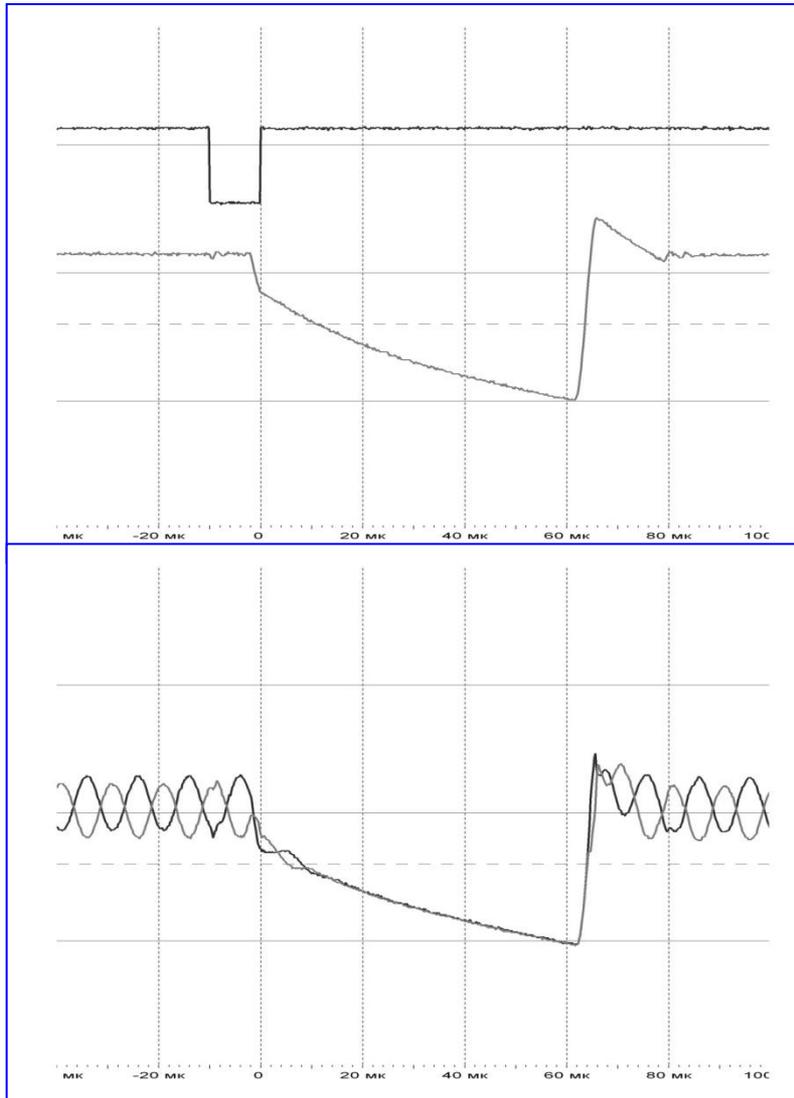


Осциллограммы в основных узлах ИП и ЭМО (с компаратором напряжения Cmp-1.17) (тестовый режим)

Сверху вниз:

- Импульс тока нагрузки при имитации «защелкивания» (масштаб по вертикали 10мА/дел.)
 - Напряжение на шине уровня питания V_{cc} (масштаб по вертикали 5В/дел.)
 - Форма сигнала на дифференциальном выходе компаратора напряжения Cmp-1.17. (масштаб по вертикали 1В/дел.).
- Входной сигнал: синусоидальный

Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)



Осциллограммы в основных узлах ИП и ЭМО (с ТИУ Ampl-1.14) (тестовый режим)

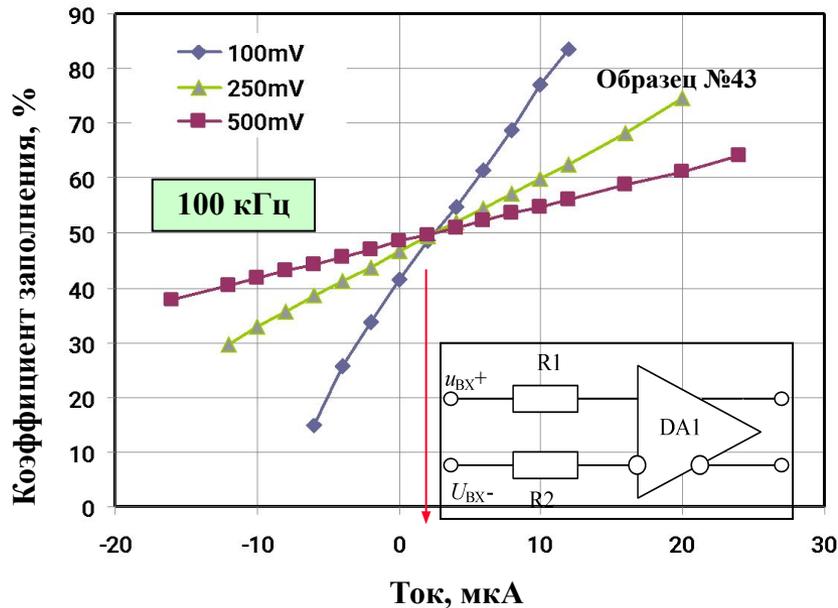
Влияние емкости нагрузки: шина Vcc ЭМО
шунтирована конденсатором >200нФ

Сверху вниз:

- Импульс тока нагрузки при имитации «защелкивания» (масштаб по вертикали 20мА/дел.)
 - Напряжение на шине питания Vcc (+5В) (масштаб по вертикали 5В/дел.)
 - Форма сигнала на дифференциальном выходе ТИУ Ampl-1.14. (масштаб по вертикали 5В/дел.).
- Входной сигнал: синусоидальный

Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Предварительные измерения параметров образцов



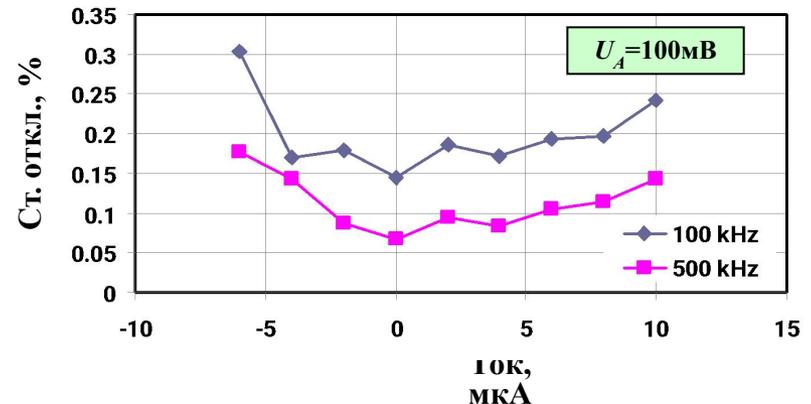
Входной ток смещения (покоя) инвертирующего входа: $\sim 2.5 \mu\text{кА}$

Оценка точности измерений в зависимости от амплитуды и частоты входного сигнала.

ИС компаратора Стр-1.17

Коэффициент заполнения выходного сигнала в зависимости от входного тока инвертирующего входа ($InInv$) при различных амплитудах входного синусоидального напряжения.

$R1=10 \text{ Ом}$, $R2=10 \text{ кОм}$



Учет влияния проникающей радиации в «Spice-подобных» программах

О.В. Дворников

**д.т.н., доц. (ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн",
г. Минск, Беларусь)**

oleg_dvornikov@tut.by



Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «SPICE-параметров» *n-p-n* БТ

$$\frac{1}{BF_F} = \frac{1}{BF_0} + TF \cdot K_{\tau NB} F_N \approx \frac{1}{BF_0} + TF \cdot K_B F_N,$$

$$BF \approx \frac{N_{DE} x_E D_{NB}}{N_{AB} W_{BA} D_{PE}} \sim \frac{\mu_{NB} N_{DE}}{\mu_{PE} N_{AB}} \sim \frac{N_{DE}}{N_{AB}},$$

$$VAF = \frac{Q_{B0}}{C_{JC0}} \sim N_{AB} d_C \sim N_{AB} \sqrt{\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}},$$

$$IS \approx \frac{q D_{NB} n_I^2 S_E}{N_{AB} W_{BA}} \sim \frac{\mu_{NB}}{N_{AB}} \sim \frac{1}{N_{AB}},$$

Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «*SPICE*-параметров»

$$TF \approx \frac{W_{BA}^2}{2D_{NB}} \sim \frac{1}{\mu_{NB}},$$

$$ISE_F = ISE_0 \frac{d_{EF}}{d_E} + qn_I v_{SF} K_{SURF} \frac{n_I}{N_{AB}} P_E (d_{EF} + d_{SURF}),$$

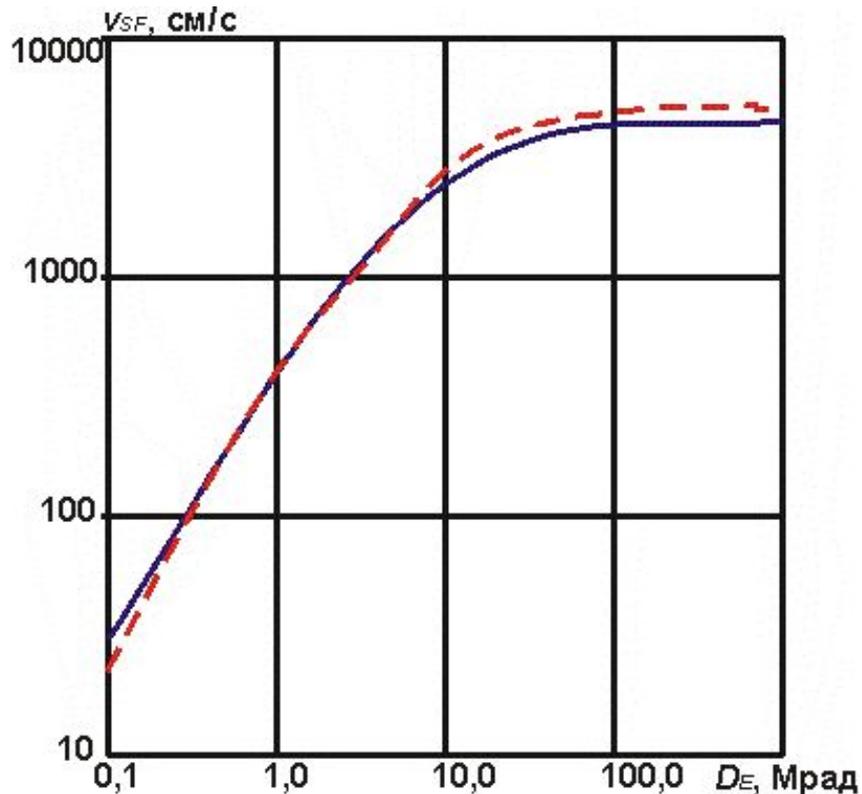
для $n - p - n$

$$ISE_F = ISE_0 \frac{d_{EF}}{d_E} + qn_I v_{SF} K_{SURF} \frac{n_I}{N_{DB}} P_E W_{BA},$$

для $Lp - n - p$

Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «SPICE-параметров» *n-p-n* БТ



Зависимость скорости поверхностной рекомбинации v_{SF} от дозы поглощенного излучения D_E быстрых электронов. Штриховая линия – известные экспериментальные данные, сплошная линия – примененная аппроксимация

Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «*SPICE*-параметров» *n-p-n* БТ

$$IKF = \frac{Q_{B0} S_E}{TF} \approx \frac{q N_{AB} W_{BA} S_E}{TF} \sim N_{AB} \mu_{NB} \sim N_{AB},$$

$$RC \sim N_{DC}^{-1}, RE \sim N_{DE}^{-1}, RB \sim N_{AB}^{-1},$$

$$V_{BR} \cong 60 \left(\frac{E_G}{1,1} \right)^{1,5} \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-0,75} \sim N_B^{-0,75}.$$

Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «*SPICE*-параметров» ПТП

$$BETA = \frac{4\varepsilon\varepsilon_0\mu_{CH}W}{3aL} \sim \mu_{CH},$$

$$VTO = \frac{qN_{CH}a^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} \sim N_{CH},$$

$$LAMBDA \sim N_{CH}^{-0,5}, RD \sim N_D^{-1}, RS \sim N_S^{-1}.$$

Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение основных параметров полупроводников

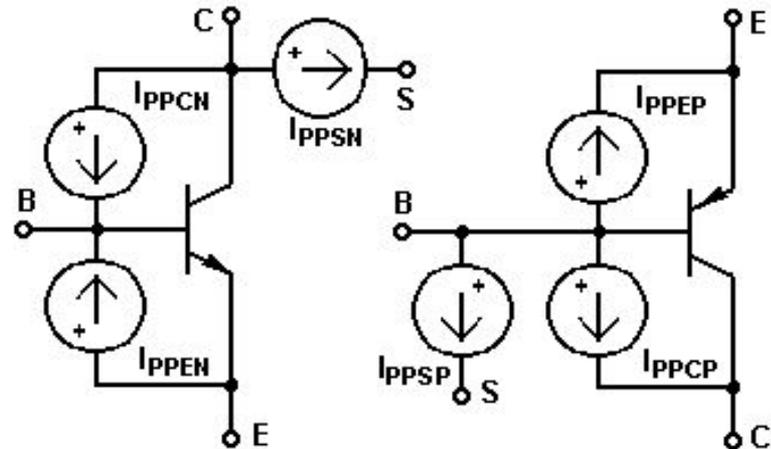
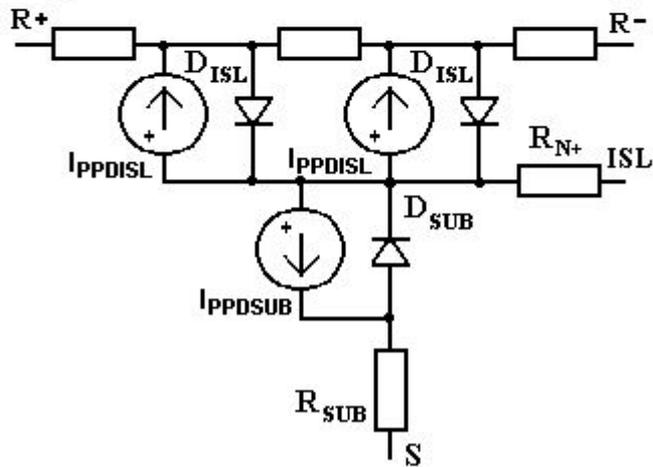
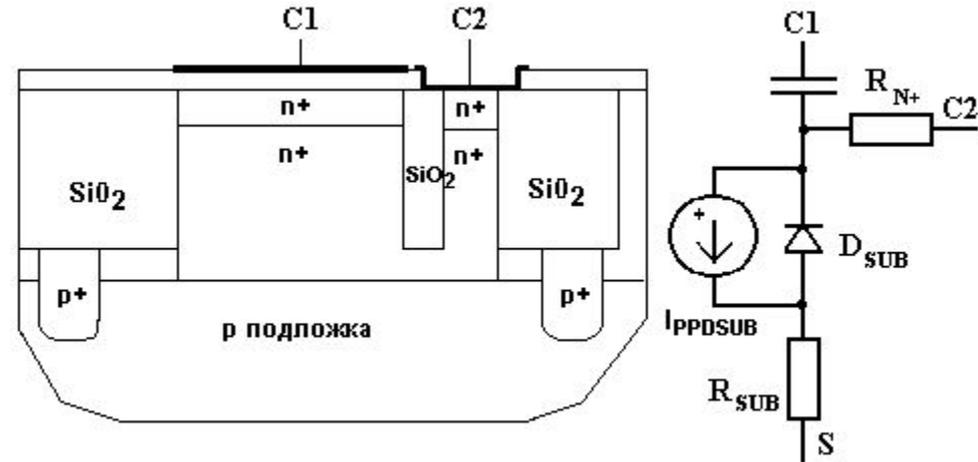
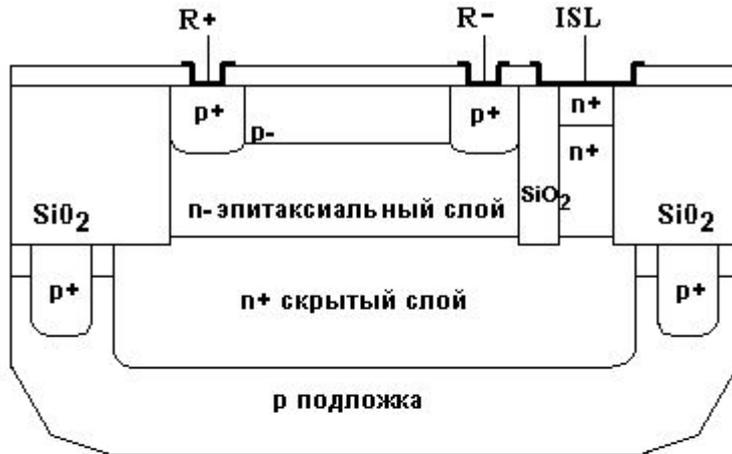
$$\frac{n_F}{n_0} = \exp(-K_N F),$$

$$K_N = \frac{1}{c n_0^\gamma},$$

$$\frac{1}{\mu_F} = \frac{1}{\mu_0} + K_\mu F.$$

Учет влияния проникающей радиации

Учет фототоков в интегральных элементах



Учет влияния проникающей радиации

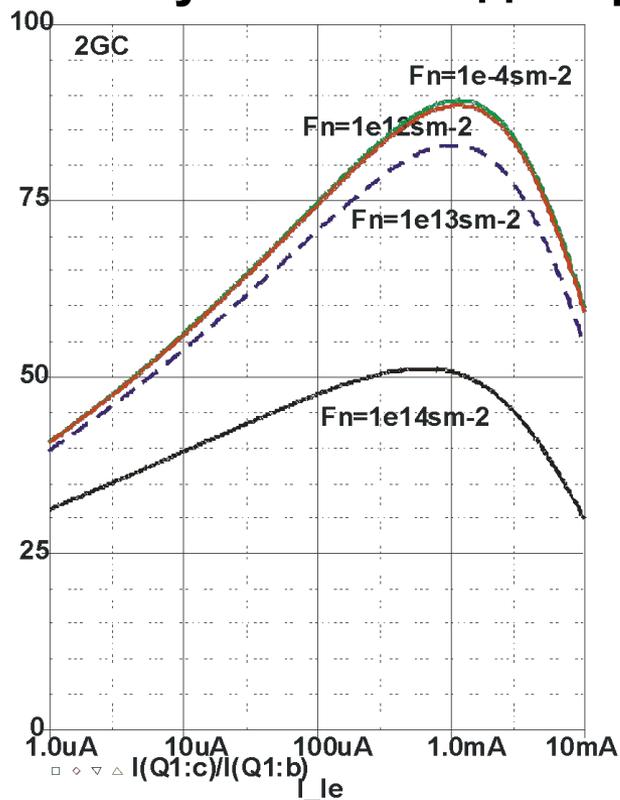
Работоспособность моделей проверена при моделировании ВАХ элементов «АБМК_1_3».

Кроме деградации β при воздействии потока нейтронов и гамма-излучения, выявлено:

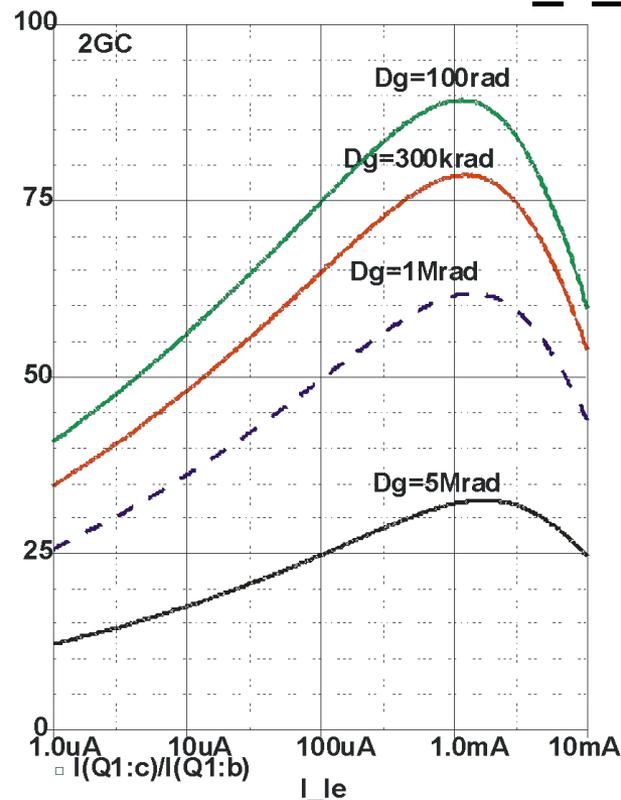
- отсутствие изменения выходного малосигнального сопротивления $n-p-n$ - транзисторов и уменьшение выходного малосигнального сопротивления горизонтальных $p-n-p$ -транзисторов при воздействии потока нейтронов, что может быть объяснено существенно большей концентрацией примеси в базе $n-p-n$, по сравнению с $p-n-p$;
- отсутствие изменения характеристик p -ПТП при гамма-облучении и небольшое уменьшение напряжения отсечки при воздействии потока нейтронов, что может быть объяснено незначительным изменением подвижности и уменьшением концентрации основных носителей заряда в канале p -ПТП.

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



а) при различной величине интегрального потока нейтронов F_n

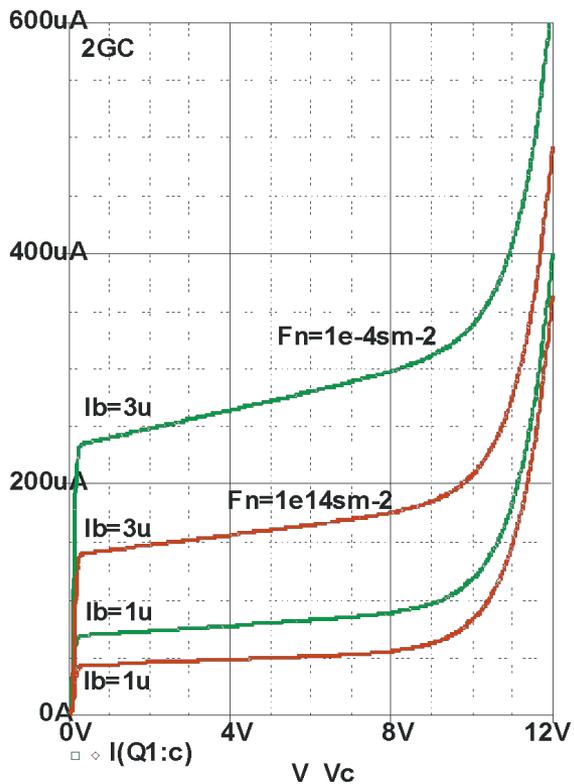


б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения D_g

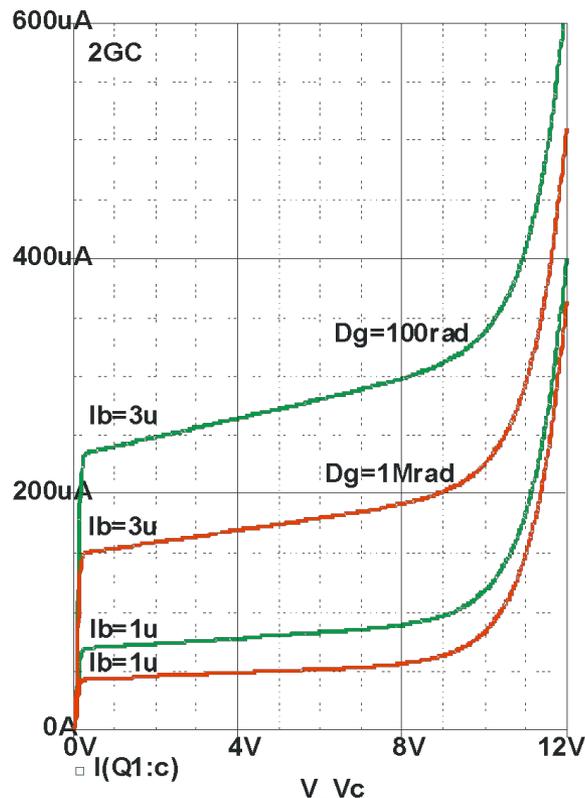
Зависимость β от эмиттерного тока $n-p-n$ - транзистора типа 2GC

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



а) при различной величине интегрального потока нейтронов F_n

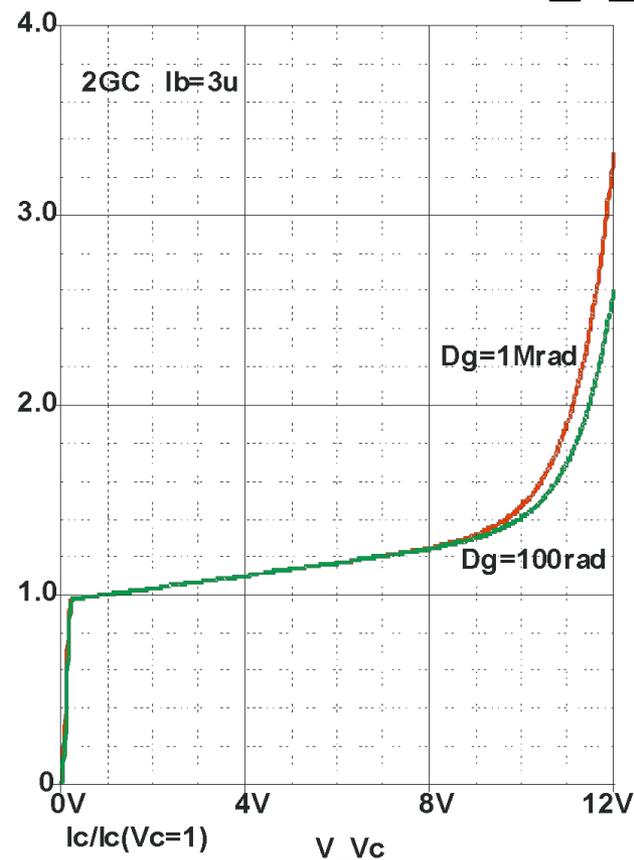
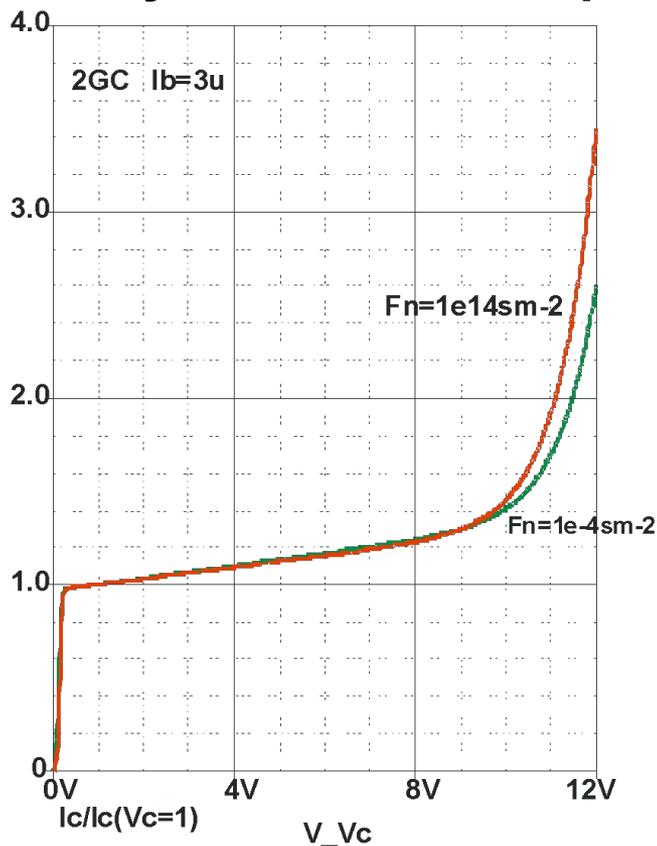


б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения D_g

ВАХ в схеме с ОЭ *n-p-n*- транзистора типа 2GC

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»

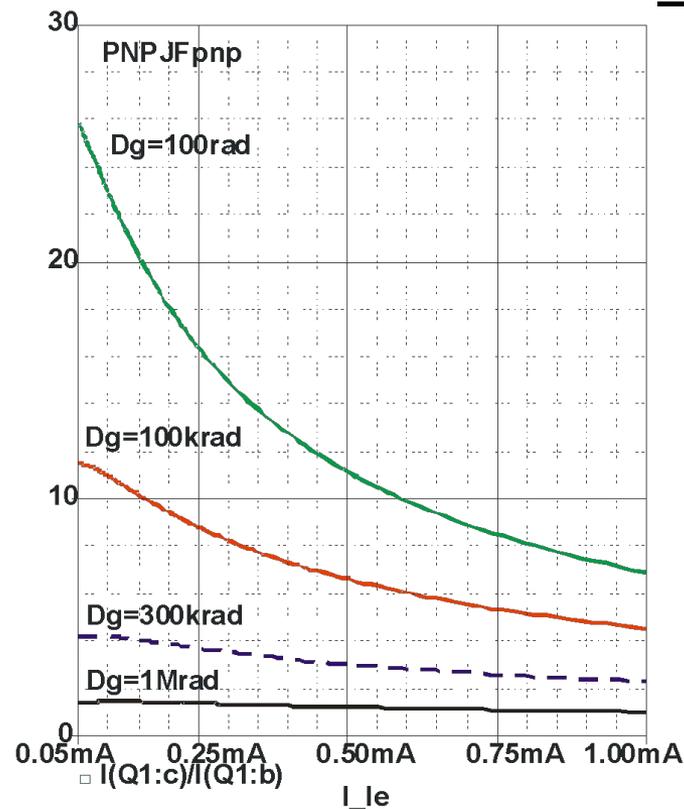
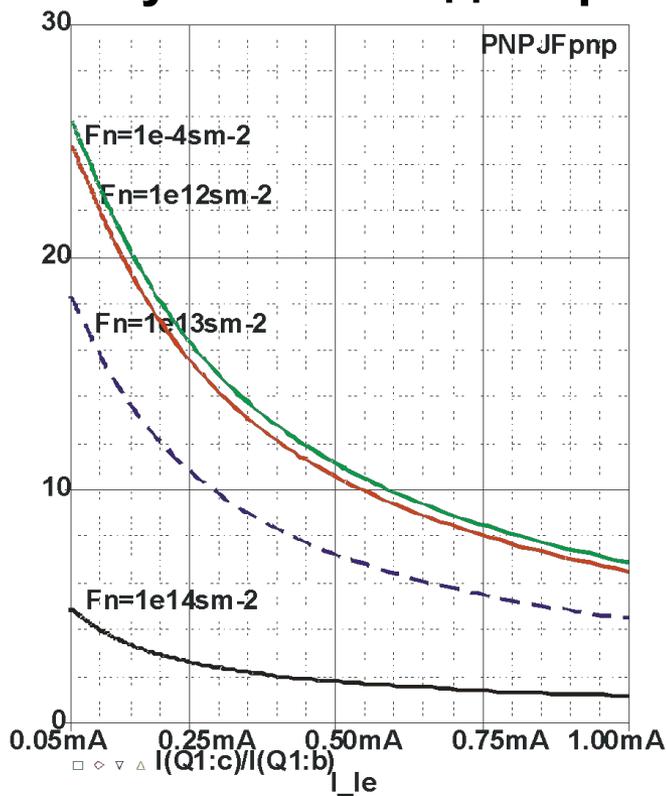


а) при потоке нейтронов $F_n = 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ б) при поглощенной дозе $D_g = 1 \text{ Mrad}$

Нормированная ВАХ в схеме с ОЭ *n-p-n*-транзистора типа 2GC

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



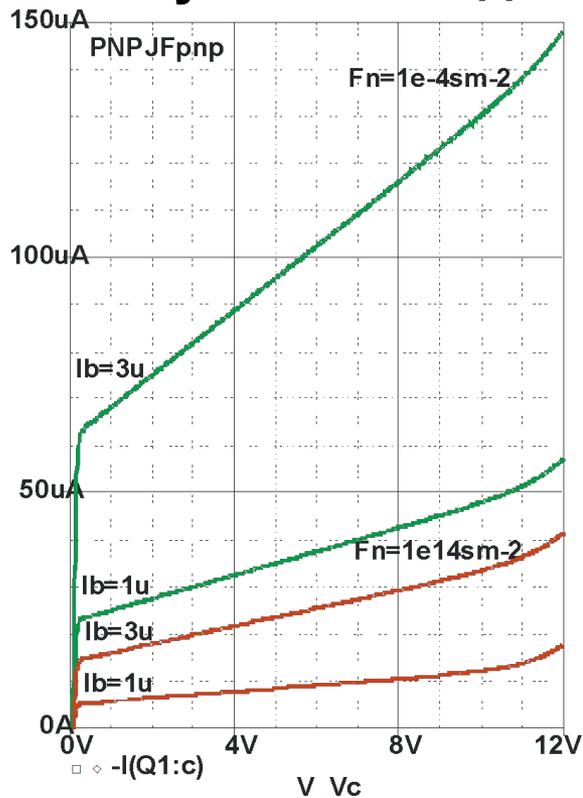
а) при различной величине интегрального потока нейтронов F_n

б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения D_g

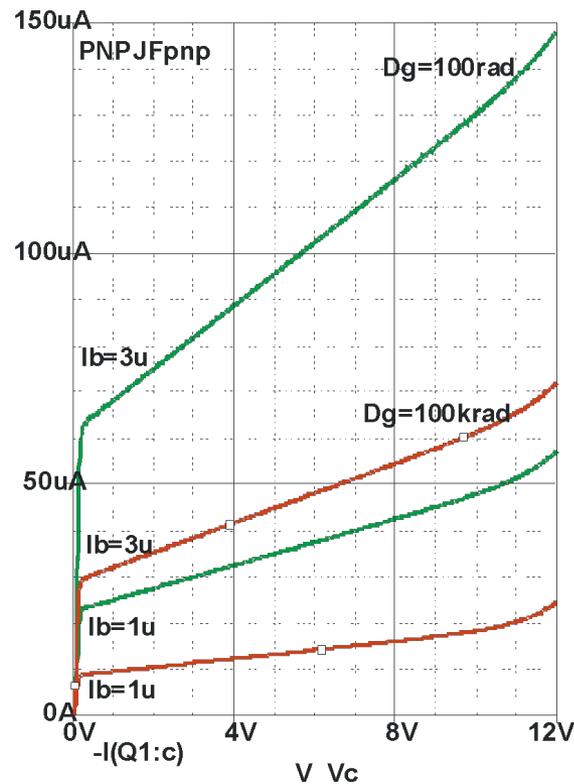
Зависимость β от эмиттерного тока $p-n-p$ транзистора типа *PNPJFpnp*

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



а) при различной величине интегрального потока нейтронов F_n

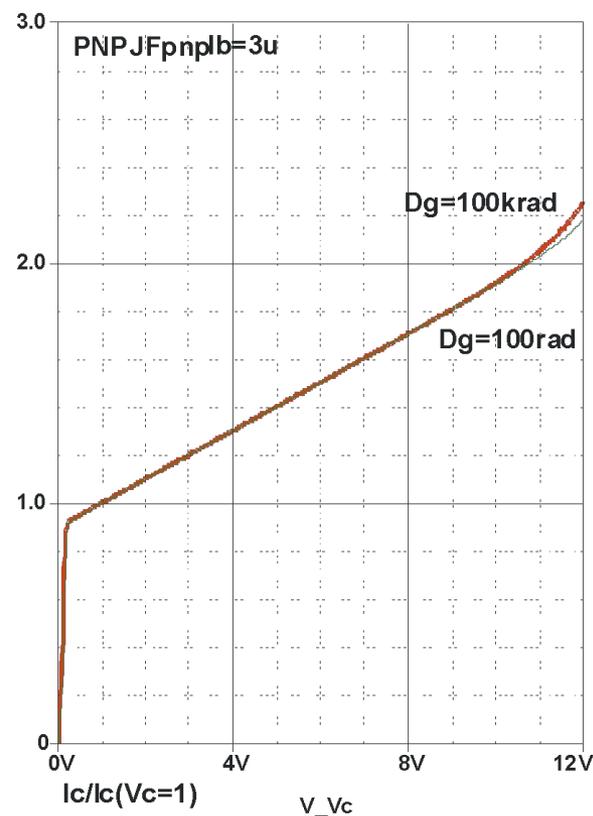
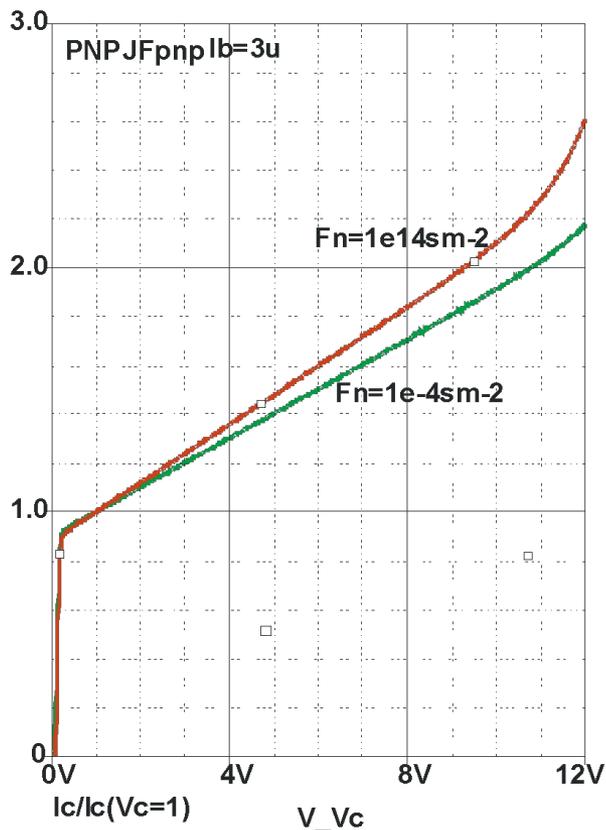


б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения D_g

ВАХ в схеме с ОЭ *p-n-p* транзистора типа *PNPJFnp*

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»

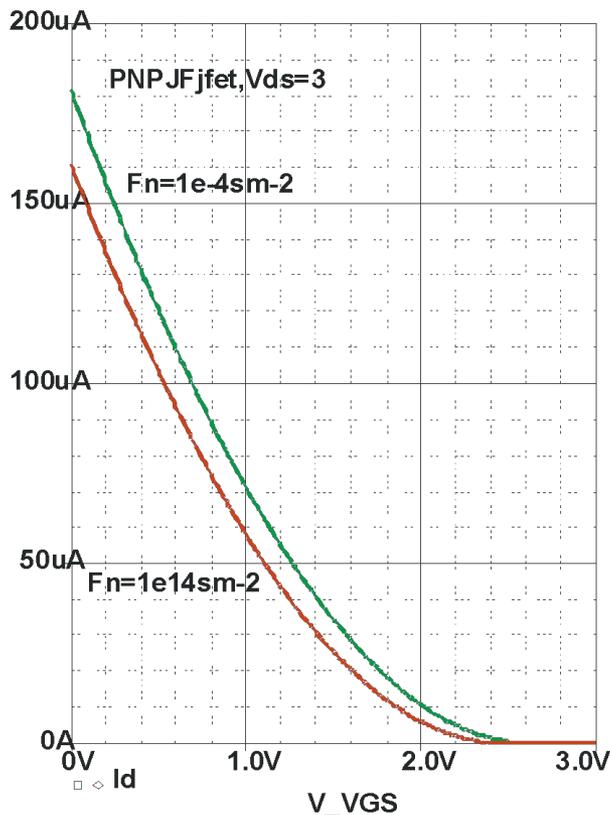


а) при потоке нейтронов $F_n=10^{14}cm^{-2}$ б) при поглощенной дозе $D_g=100krad$

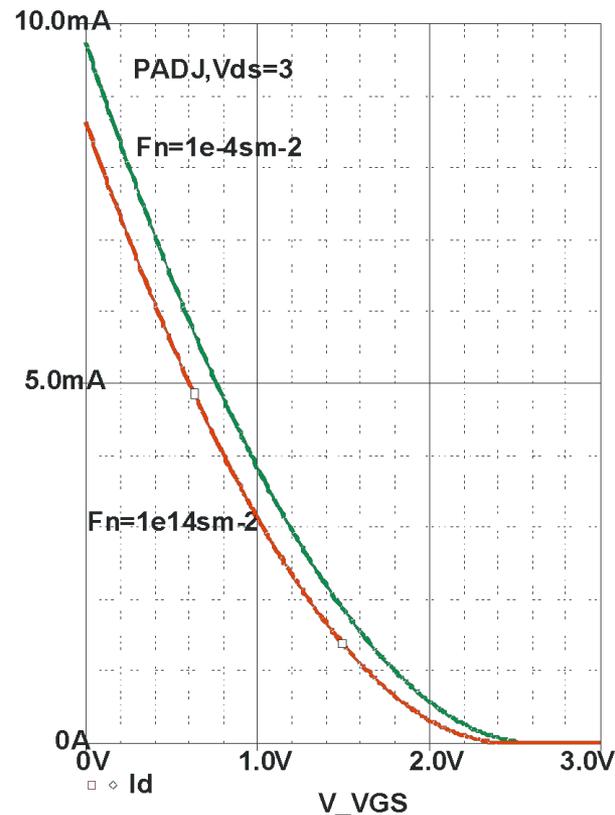
Нормированная ВАХ в схеме с ОЭ *p-n-p* транзистора типа *PNPJFnpn*

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



а) p -ПТП типа *PNPJfet*

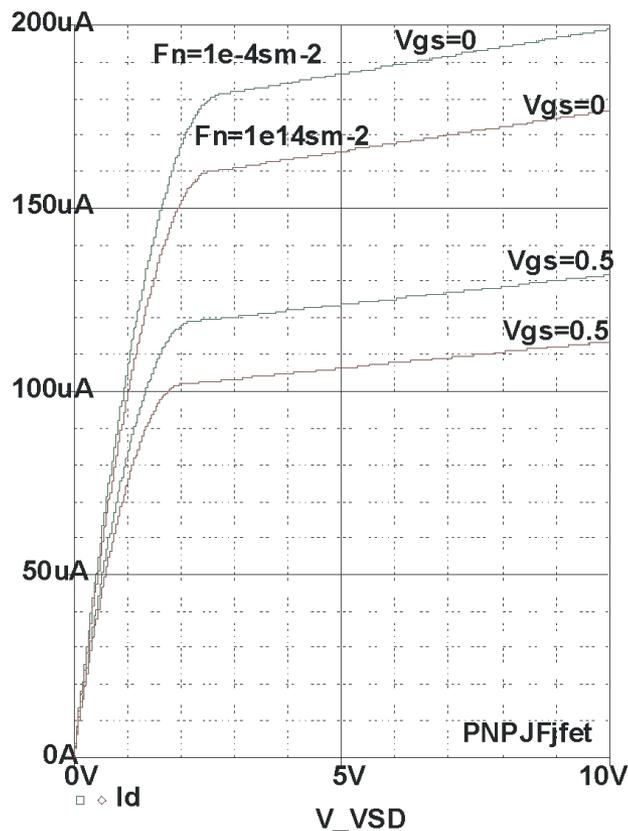


б) p -ПТП типа *PADJ*

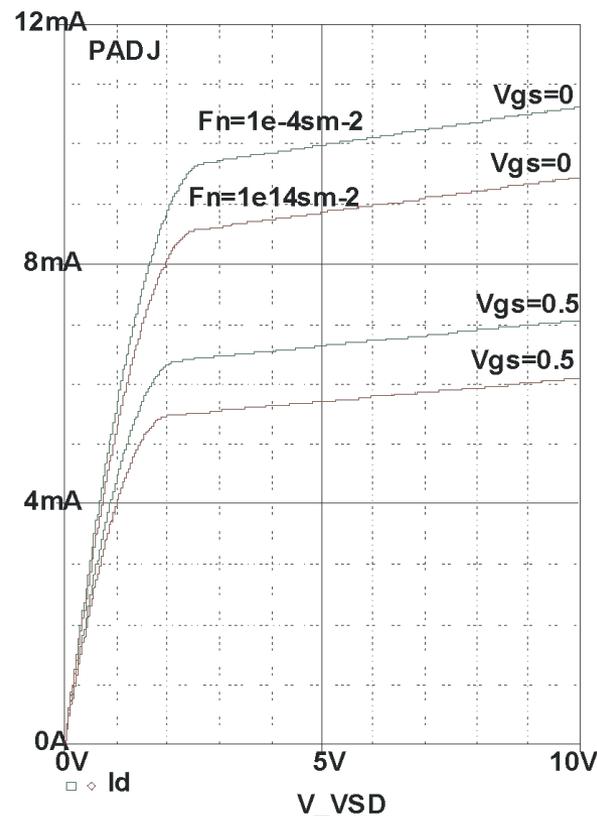
Зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при различной величине интегрального потока нейтронов F_n

Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



а) р-ПТП типа *PNPJFfet*



б) р-ПТП типа *PADJ*

ВАХ в схеме с ОИ при различной величине интегрального потока нейтронов F_n