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



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;

- 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.



Вид структуры кристалла

Элементы структуры		Обозначение	Толщина,	Тип	Поверхностное
			МКМ	проводи-	сопротивление,
				мости	Ом/•
Пластина кремниевая	Подложка	HO	460±20	р	10±2,0 Ом/см
эпитаксиальная со	N+ - скрытый слой	H1	6,0±1,0	n+	35±8
скрытым слоем	Р+ - 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	—	—
Р - канал		H7	1,4±0,3	p-	5500±700
Р+ - база		H8	0,6±0,1	p+	80±20
Р- 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

Параметры транзисторов и тестовых элементов

Наименование параметра, размерность, режим измерения	Норма			
<i>п-р-п</i> БТ				
Коэффициент усиления $\beta (\Delta I_B = 1 \text{ мкA}, V_{CE} = 1 \text{ B}, N_B = 5)$	>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 _{ЕВВR} , В	>4,5			
<i>L р-п-р</i> БТ				
Коэффициент усиления $\beta (\Delta I_B = 1 \text{ мкA}, V_{CE} = 1 \text{ B}, N_B = 5)$	>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 _{ЕВВR} , В	>10			

Параметры транзисторов и тестовых элементов

Наименование параметра, размерность, режим измерения	Норма			
Малосигнальный <i>р</i> - ПТП				
Максимальный ток стока, мкА, ($V_{DS} = 4$ 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 малошумящих и широкополосных аналоговых ИС. «АБМК_1_3» содержит четыре идентичных канала, каждый из которых состоит из двух макрофрагментов.



ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»

Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «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;
- РАДС 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; *п-р-п*-транзисторы (*NPNC*) для источников стабильного тока; МОП- конденсаторы с емкостью 0,95 пФ; функционально-интегрированные элементы (*PNPJF*), представляющие собой каскодное соединение *p-п-р*-транзистора и *p*-ПТП; *n-p-п*-транзисторы с объединенными коллекторами (*GC*); 4-х- слойные полупроводниковые структуры (*TW*), позволяющие с помощью различного выполнения межсоединений областей получить два *n-p-n*-или *p-п-р*-транзистор.

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

Экспериментальная установка описана в Сообщении ОИЯИ, P13-96-403. 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 - ¹³⁷Cs, комнатная температура, без электрического режима.

Интегральный Поглощенная доза, Плотность потока поток нейтронов, Мрад или мощность дозы н/см², *En*>100 кэВ

2*10 ¹⁴	0,12	2*10 ¹⁰ н/(см ² *с)
9*10 ¹²	-	2*10 ¹⁰ н/(см ² *с)
-	1,0	180 крад/ч



Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора *p-n-p*- транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов 9*10¹²н/см² Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора *p-n-p*- транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов 2*10¹⁴ н/см²



Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малошумящего *n-p-n* транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов 9*10¹²н/см² Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малошумящего *n-p-n* транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов 2*10¹⁴ н/см²



Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малосигнального *n-p-n* транзистора: 1– до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов 9*10¹²н/см²

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»



Зависимость коэффициента усиления тока β от тока коллектора малосигнального *n-p-n* транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов 2*10¹⁴ н/см²



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

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



Электрическая схема усилителя Тетрод-Б



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

1 – до облучения,

2 - после воздействия потока нейтронов 9*10¹²н/см²,

3 - после гамма- облучения, поглощенная доза 1 Мрад,

4 - после воздействия потока нейтронов 2*10¹⁴ н/см²

$$ENC^2 \approx \alpha_{S2}T_Pq\left(\frac{2kT}{qR_F} + \frac{I_E}{\beta}\right) +$$

$$+\frac{\alpha_{S1}}{T_P}kT(C_D + C_F + C_{INPAMP})^2\frac{\varphi_T}{I_E} + \frac{2\alpha_{S1}}{T_P}kTR_B(C_D + C_F)^2$$

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

Выводы по результатам испытаний:

- *n-p-n*, *p*-ПТП сохраняют свою работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов 2*10¹⁴ н/см², а горизонтальные *p-n-p*транзисторы - при потоке нейтронов до 9*10¹² н/см².
- Изменение величины сопротивления резисторов при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов 2*10¹⁴ н/см² не происходит в пределах погрешности измерений.
- Среднее изменение параметров *р*-ПТП составляет

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

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.

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

Объект испытаний: ИС 8-ми канального усилителяформирователя-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.

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



Зависимость постоянного напряжения на выходе формирователя от интегрального потока нейтронов





Зависимость длительности выходного импульса от интегрального потока нейтронов



Зависимость среднего значения коэффициента преобразования усилителя от интегрального потока нейтронов



Зависимость порога срабатывания дискриминатора от интегрального потока нейтронов

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»

Average ENC of irradiated ANODE ASIC's



Зависимость шумов от интегрального потока нейтронов

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»

Исследование "эффектов одиночных событий" (SEE) при облучении ИС нейтронами с энергией En>20 МэВ



Схема проведения эксперимента

Исследование "эффектов одиночных событий" (SEE) при облучении ИС нейтронами с энергией *En*>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*~10мс. Сигнал с выхода одновибратора подавался на счетчик, контролируемый в процессе облучения.

Результаты эксперимента показали **отсутствие эффекта «защелкивания»** (*SEL*), вплоть до интегрального потока нейтронов 6*10¹¹ н/см² с энергией *En*>20МэВ.

Исследование "эффектов одиночных событий" (SEE) при облучении ИС нейтронами с энергией En>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.

Исследование "эффектов одиночных событий" (SEE) при облучении ИС нейтронами с энергией En>20 МэВ

Исследование кратковременных сбоев (SEU)

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



Исследование "эффектов одиночных событий" (SEE) при облучении ИС нейтронами с энергией En>20 МэВ

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



250

Threshold (mV)

300

350

400

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

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»

100

150

200

50

1.0E-09

450

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 радиационностойких микросхем

Припроектированиирадиационно-стойкихмикросхемцелесообразноприменениеследующего 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.
- Разработка соотношений, связывающих параметры моделей и излучения (вид излучения, энергия, поглощенная доза, интегральный поток частиц) с помощью эмпирических коэффициентов.

Подход к проектированию радиационностойких микросхем

Припроектированиирадиационно-стойкихмикросхемрекомендуетсяприменениеследующего подхода:

- 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 радиационностойких микросхем

Припроектированиирадиационно-стойкихмикросхемрекомендуетсяприменениеследующего подхода:

- 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.
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).





до модернизации

после модернизации

Напряжение на выходе усилителя *Amplifier_*1 до и после воздействия потока нейтронов



Электрическая схема программируемого операционного усилителя *Amplifier_*5



Передаточная характеристика усилителя *Amplifier_*5 до и после воздействия потока нейтронов



Электрическая схема компаратора Comparator_1



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 Fn=10¹⁴sm⁻²



до модернизации

после модернизации

Входные токи компаратора *Comparator_*1 до и после воздействия потока нейтронов

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)

Требования к схемотехнике ОУ с высоким уровнем радиационной стойкости :

1. В качестве критерия качества при схемотехническом 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 *р*-ПТП с источником вытекающего тока;

- комбинации *n-p-n*- и *p*-ПТП с перекрестными связями (ток дифференциального каскада определяется напряжением затвор-исток *p*-ПТП.

(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 каскоде" с использованием *p*-ПТП;

- на несимметричном "перегнутом каскоде" с использованием *р*-ПТП.

6. Выходной каскад должен быть выполнен по схеме двухтактного повторителя напряжения с использование 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.

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Электрическая схема источника опорного напряжения ref_3

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Выходное и нормированное выходное напряжение *ref_*3 до и после воздействия потока нейтронов

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



воздействия потока нейтронов

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Электрическая схема источника опорного напряжения ref_ST ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»

(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 БиПТПтехнологии, 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*10¹⁴ н/см², а горизонтальные *p-n-p*- транзисторы - при потоке нейтронов до 9*10¹²н/см²;
- примененные конструктивно-схемотехнические решения обеспечили отсутствие в ИС «АНОД» эффекта «защелкивания», вплоть до интегрального потока нейтронов 6*10¹¹н/см² с энергией *En*>20МэВ.

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 10¹³ 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



University

Контроль функционирования ОУ при облучении



(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Контроль функционирования компаратора при облучении



Возможное изменение выходного сигнала компаратора при радиационном воздействии

(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.

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)



Предполагаемое изменение тока потребления *I*_П и следящего порога *I*_{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_{ПСК3}) и устанавливается величина порогового тока (I_{ПОР}), при превышении которого источники напряжения питания автоматически отключаются И находятся Β выключенном состоянии до повторного включения (перезапуска). Каждый перезапуск источников напряжения питания рассматривается как SELсобытие. $I_{\Pi OP} = (1, 5...2) I_{\Pi CK3}$. 59

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
- Х –электрические разъемы

Установка для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий



Стандартное оборудование:

Осциллограф В-423.

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

Специализированное оборудование: ИП – источник питающих уровней МО - модуль основной ЭМО – электронный модуль с образцом СУ - согласующее устройство

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



<u>MO + ЭMO</u>:

- •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

<u>ИП</u>:

- •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 «защелкивания»
- •TTL -выход для регистрации момента «защелкивания»





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 «защелкивания» : <2mA Средняя задержка срабатывания схемы защиты : <2mkc* 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







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 Vcc (масштаб по вертикали 5В/дел.)
- •Форма сигнала на дифференциальном выходе ТИУ Ampl-1.14. (масштаб по вертикали 5В/дел.).

Входной сигнал: синусоидальный



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

Сверху вниз:

- •Импульс тока нагрузки при имитации «защелкивания» (масштаб по вертикали 10мА/дел.)
- •Напряжение на шине уровня питания Vcc (масштаб по вертикали 5В/дел.)
- •Форма сигнала на дифференциальном выходе компаратора напряжения Стр-1.17. (масштаб по вертикали 1В/дел.).

Входной сигнал: синусоидальный



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



Предварительные измерения параметров образцов

Входной ток смещения (покоя) инвертирующего входа: ~2.5мкА

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 Ом, R2=10 кОм



Учет влияния проникающей радиации в «Spiceподобных» программах

О.В. Дворников д.т.н., доц. (ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн", г. Минск, Беларусь) oleg_dvornikov@tut.by



University

Радиационное изменение «SPICE-параметров» *п-р-п БТ*

$$\begin{aligned} \frac{1}{BF_F} &= \frac{1}{BF_0} + TF \cdot K_{\tau NB} F_N \approx \frac{1}{BF_0} + TF \cdot K_B F_N, \\ BF &\approx \frac{N_{DE} x_E D_{NB}}{N_{AB} W_{BA} D_{PE}} \sim \frac{\mu_{NB} N_{DE}}{\mu_{PE} N_{AB}} \sim \frac{N_{DE}}{N_{AB}}, \\ VAF &= \frac{Q_{B0}}{C_{JC0}} \sim N_{AB} d_C \sim N_{AB} \sqrt{\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}}, \\ IS &\approx \frac{q D_{NB} n_I^2 S_E}{N_{AB} W_{BA}} \sim \frac{\mu_{NB}}{N_{AB}} \sim \frac{1}{N_{AB}}, \end{aligned}$$

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 $Lp - n - p$

Радиационное изменение «SPICE-параметров» *п-р-п БТ*



Радиационное изменение «SPICE-параметров» *п-р-п БТ*

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

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

$$V_{BR} \cong 60 \left(\frac{E_G}{1,1}\right)^{1,5} \left(\frac{N_B}{10^{16}}\right)^{-0.75} \sim N_B^{-0.75}.$$
Радиационное изменение «SPICE-параметров» ПТП

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

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

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

Радиационное изменение основных параметров полупроводников

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

$$K_N = \frac{1}{cn_0^{\gamma}},$$

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

Учет фототоков в интегральных элементах



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 гаммаоблучении 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.



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

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



ВАХ в схеме с ОЭ *п-р-п*- транзистора типа 2GC



а) при потоке нейтронов $Fn=10^{14}$ см⁻² б) при поглощенной дозе Dg=1 Мрад

Нормированная ВАХ в схеме с ОЭ *п-р-п*-транзистора типа 2GC

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»



а) при различной величине интегрального потока нейтронов *Fn* б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения *Dg*

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



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

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»



а) при потоке нейтронов *Fn*=10¹⁴см⁻² б) при поглощенной дозе *Dg*= 100kpaд

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

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»





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

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК_1_3»

