

Отработка методики оперативной оценки дозовой нагрузки объектов в полях ИИ Бутин А. В.

Бутин Алексей Валентинович / Butin Aleksey 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 поглощенной дозы гамма-излучения р-канальных МОП-транзисторов из состава цифровых интегральных микросхем РЭА. Выполнены измерения исходных характеристик микросхем, проведено их облучение на моделирующей установке ГУ-200 и получены калибровочные зависимости для дальнейшего использования микросхем в качестве детекторов поглощенной дозы.

Ключевые слова: интегральная микросхема, ионизирующее излучение, монитор структурных повреждений, моделирующая установка.

Введение

При проведении испытаний крупногабаритных объектов, содержащих массивные корпусные элементы, возникают проблемы, связанные с определением фактической дозовой нагрузки радиационно-чувствительных элементов. Эти проблемы обостряются при проведении исследований в условиях с отличающимся спектром и составом излучений. В большинстве случаев штатные средства дозиметрического сопровождения не обеспечивают оперативную регистрацию характеристик воздействующего излучения. Использование мониторов структурных повреждений (МСП) для регистрации нейтронного излучения показало хорошую воспроизводимость результатов, что послужило основанием для разработки аналогичной методики применения детекторов, реагирующих на поглощенную дозу ионизирующего излучения.

Методика основана на использовании электрофизической модели дозовых эффектов в МОП-приборах [1, 2, 3, 4]. В основе электрофизической модели лежат зависимости, связывающие кинетику дозовых эффектов с изменением основных электрических характеристик МОП-приборов – сдвигом порогового напряжения и изменением крутизны сток-затворной характеристики. Эти изменения рассматриваются как совокупное проявление генерационно-релаксационных процессов, кинетика которых имеет математическое описание, основанное на физических представлениях о природе доминирующих эффектов.

При разработке пояснительной записки, использовались рекомендации, приведенные в [5].

Методика применения р-канальных МОП-транзисторов для оценки дозовой нагрузки

Для экстракции первичных зависимых параметров электрофизической модели используются экспериментально полученные сток-затворные характеристики МОП-приборов.

С помощью предварительной калибровки р-канальных МОП-транзисторов по изменению их сток-затворной характеристики может быть произведена оперативная оценка дозовой нагрузки объектов испытаний.

Поскольку кинетика генерационно-релаксационных процессов в n-канальных МОП-транзисторах имеет ярко выраженную связь с условиями облучения (температурой среды, интенсивностью излучения и электрическим режимом), для детекторов поглощенной дозы более подходят р-канальные МОП-транзисторы.

Основной задачей исследований дозовой стойкости МОП-приборов является обеспечение наилучшего соответствия результатов измерения поглощенной дозы в чувствительном объеме МОП-прибора, используемого в качестве дозиметра, значению поглощенной дозы в чувствительном объеме МОП-приборов из состава исследуемой аппаратуры. Для этого в качестве чувствительного элемента целесообразно использовать р-канальные МОП-транзисторы из состава простейших цифровых интегральных схем (инверторов, схем И-НЕ, ИЛИ-НЕ, триггеров Шмидта и др.), близких по конструкции и технологии изготовления к испытываемым объектам.

Процесс предварительной калибровки

На этапе предварительной калибровки в соответствии с приведенной схемой включения предлагается регистрировать сток-затворную характеристику путем изменения напряжения питания при близких к нулю значениях напряжения на затворе выходного р-канального МОП-транзистора ЦИС.

Облучение р-канального МОП-транзистора дозой $D(t) = P \cdot t$ приводит к изменению его сток-затворной характеристики $I_{DS(D)}$

$$I_{DS(D)} = \frac{W}{2L} \frac{\mu_0 \cdot C_{ox}}{(1 + K_{\mu} \cdot \mu_0 \cdot D)} (V_{GS} - V_{T0} - K_{\Delta V_T} \cdot D)^2, \quad (1)$$

где L и W – соответственно, длина и ширина канала (являются типовыми для данной технологии изготовления МОП-приборов);

μ_0 – исходное значение подвижности носителей в канале,

C_{ox} – удельная емкость подзатворного диэлектрика,

K_μ – коэффициент дозовой чувствительности подвижности электронов в канале.

V_{GS} – напряжения на затворе (в нашем случае $V_{GS} = V_{CC}$, V_{T0} – пороговое напряжение),

$K_{\Delta V_T}$ – коэффициент дозовой чувствительности,

Вводя обозначения $a = K_\mu \cdot \mu_0$ и $b = \frac{K_{\Delta V_T}}{V_{GS} - V_{T0}}$, получим упрощенное выражение для тока р-канального МОП-транзистора при фиксированном значении напряжения питания:

$$I_{DS(D)} = I_{DS(0)} \frac{1}{(1 + a \cdot D)} (1 - b \cdot D)^2 \quad (2)$$

где $I_{DS(0)}$ – значение тока в начальный момент времени (до облучения).

Значения параметров a и b могут быть получены по результатам калибровки на источнике с известным спектром и интенсивностью излучения, например, изотопной установке ГУ-200.

Алгоритм применения р-канальных МОП-транзисторов ЦИС

Методика применения р-канальных МОП-транзисторов ЦИС в качестве детекторов может сводиться к следующему алгоритму:

1. На МУ с известной мощностью и спектром нагружения определяются сдвиг порогового напряжения и изменение крутизны р-канальных транзисторов из состава МОП ЦИС в диапазоне значений уровней нагружения 20-50 крад (Si).

2. В условиях нагружения с неизвестным спектром излучения регистрируется изменение тока стока р-канальных транзисторов при фиксированном напряжении питания, обеспечивающем надпороговый режим работы.

3. Используя значения параметров a и b , полученных при калибровке, рассчитывается соответствующее значение поглощенной дозы для каждого из детекторов для данного временного интервала облучения.

4. В случае переоблучения МОП-транзистора в процессе исследований для расчета фактического значения поглощенной дозы в последующие моменты времени используется временная диаграмма относительного изменения мощности источника и результаты предшествующих измерений.

Схема измерительного стенда

Для измерения радиационно-зависимых параметров р-канальных МОП-транзисторов из состава ЦИС предлагается использовать следующую схему:

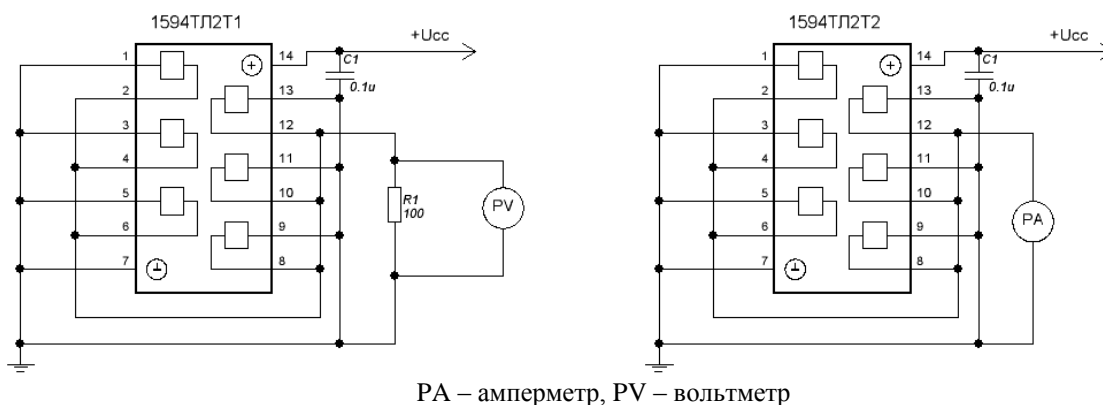


Рис. 1. Структурная схема подключения микросхем при проведении измерений

Преимуществом предложенной схемы включения (рисунок 1) является то, что при многоканальной регистрации измеряется только ток стока соответствующего МОП-транзистора в надпороговом режиме, а его изменение имеет физически обоснованную зависимость от накопленной дозы. Кроме того, для N детекторов необходимо иметь всего N+1 измерительную линию. Это особенно существенно при использовании стандартных автоматизированных систем, когда в процессе исследований отсутствует возможность регистрации полной сток-затворной характеристики, но можно реализовать точечные измерения при фиксированном значении напряжения питания.

Результаты измерений

В ходе замеров, получаем два файла с расширением *.csv и *.png для цифровых и графических данных соответственно. Внешний вид данных файлов для микросхемы №1 представлен на таблице 1(*.csv) и рисунке 2 (*.png).

Таблица 1. Численные значения параметров, полученные в процессе измерений

x-axis	Вход №1	Вход №2
ms	Volt	Volt
-539.00E-06	-1.97266E-03	+31.32812E-03
-538.00E-06	-2.07032E-03	+32.50000E-03
...
+14.00E-06	-2.16798E-03	+613.75000E-03
+15.00E-06	-2.16798E-03	+614.53125E-03
...
+433.00E-06	+249.00390E-03	+992.65626E-03
+434.00E-06	+250.85937E-03	+993.04689E-03
+435.00E-06	+252.22656E-03	+992.26564E-03
+436.00E-06	+246.66015E-03	+966.87501E-03

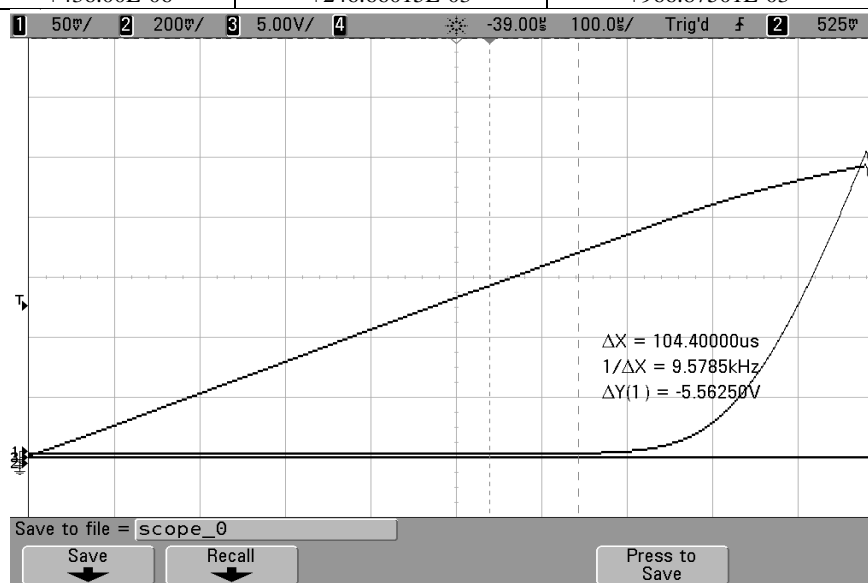


Рис. 2. Графическое представление полученных данных

Результаты измерений до облучения

Для выполнения измерений начальных значений параметров МОП-транзисторов ИМС собираем установку, структурная схема которой приведена на рисунке 3.

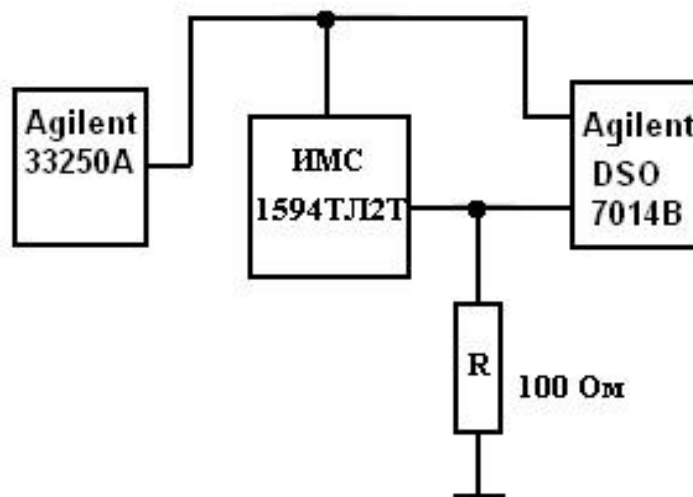


Рис. 3. Структурная схема установки

Последовательность выполнения измерений:

1. На выходе генератора сигналов Agilent 33250A устанавливаем периодический линейно возрастающий сигнал со следующими параметрами:

- начальное смещение – 0,0 В;
- частота следования сигнала – 1,05 кГц;
- амплитуда – 1,0 В.

2. Выход генератора Agilent 33250A соединяем с первым входом осциллографа Agilent DSO 7014B и входами ИМС №1 и устанавливаем чувствительность первого канала осциллографа Agilent 7014B 500 мВ/дел.

3. Выходы ИМС №1 соединяем со вторым входом осциллографа Agilent 7014B и устанавливаем чувствительность третьего канала осциллографа 500 мВ/дел.

4. Переводим осциллограф Agilent 7014B в режим синхронизации от сигнала по первому входу.

5. Регистрирует осциллограмму контролируемых сигналов.

6. Сохраняем осциллограмму в форматах .csv (таблица числовых значений параметров сигналов) и .png (графическое представление сигналов).

7. Повторяем последовательность операций по пп. 1) -6) для трех других детекторов (ИМС №2 и №3).

Обработка результатов измерений

По таблице результатов измерений для каждого образца определяем значение выходного тока ИМС в надпороговой области р-канальных МОП-транзисторов при напряжении на входе 1,0 В.

Учитывая значение резистора R1 (рисунок 1) 100 Ом, определяем значение выходного тока каждой ИМС и заносим в таблицы 2а, 2б, 2в.

Таблица 2а.

ИМС №1		
№ изм.	I _{вых} , mA	V _r , mV
972	249,004	992,656
973	250,859	993,047
974	252,227	992,266

Таблица 2б.

ИМС №2		
№ изм.	I _{вых} , mA	V _r , mV
974	264,824	990,703
975	266,68	991,484
976	267,852	989,922

Таблица 2в.

ИМС №3		
№ изм.	I _{вых} , mA	V _r , mV

974	268,145	989,531
975	269,902	990,313
976	271,074	988,75

Калибровка детекторов

Облучение детекторов проводилось на установке ГУ-200 (НИИП, г.Лыткарино) в активном режиме с измерением параметров до достижения дозы, при которой выходной ток изменяется в диапазоне значений 20-30% от начального значения.

В таблице 3 приведены результаты измерений выходного тока до и после облучения детекторов при значении входного напряжения 1,0 В.

Облучение детекторов продолжалось в течение 10 мин. до достижения поглощенной дозы значения 33,5 кР, определенного по усредненному значению показаний четырех штатных детекторов.

Таблица 3. Показания штатных детекторов на момент окончания десяти минутного облучения

№ штатного детектора	Доза 10 мин., кР
438	34,0
453	34,2
259	32,1
192	33,9
Среднее значение	33,5

Результаты измерений после облучения

В ходе замеров, получаем два файла с расширением *.csv и *.png для цифровых и графических данных соответственно. Внешний вид данных файлов для микросхемы №1 представлен на таблице 4 (файл с расширением *.csv) и рисунке 4 (файл с расширением *.png).

Таблица 4. Численные значения результатов измерений выходного тока ИМС №1

x-axis	Вход №1	Вход №2
ms	Volt	Volt
+0.0E+00	+1.57031E-03	+3.32032E-03
+1.00E-06	+1.36718E-03	+292.97E-06
+2.00E-06	+2.34374E-03	+0.0E+00
+3.00E-06	+3.32031E-03	-195.31E-06
+4.00E-06	+4.29687E-03	-97.65E-06
+5.00E-06	+5.27343E-03	-195.31E-06
...
+510.00E-06	+567.77343E-03	-683.59E-06
+511.00E-06	+568.74999E-03	-488.28E-06
+512.00E-06	+569.72656E-03	-585.93E-06
+513.00E-06	+570.70312E-03	-585.93E-06
...

+947.00E-06	+1.00527343E+00	+193.84766E-03
+948.00E-06	+1.00624999E+00	+195.21485E-03
+949.00E-06	+1.00722656E+00	+197.07032E-03
+950.00E-06	+1.00820312E+00	+198.92579E-03
+951.00E-06	+1.00820312E+00	+200.87891E-03
+952.00E-06	+415.42968E-03	+79.58985E-03

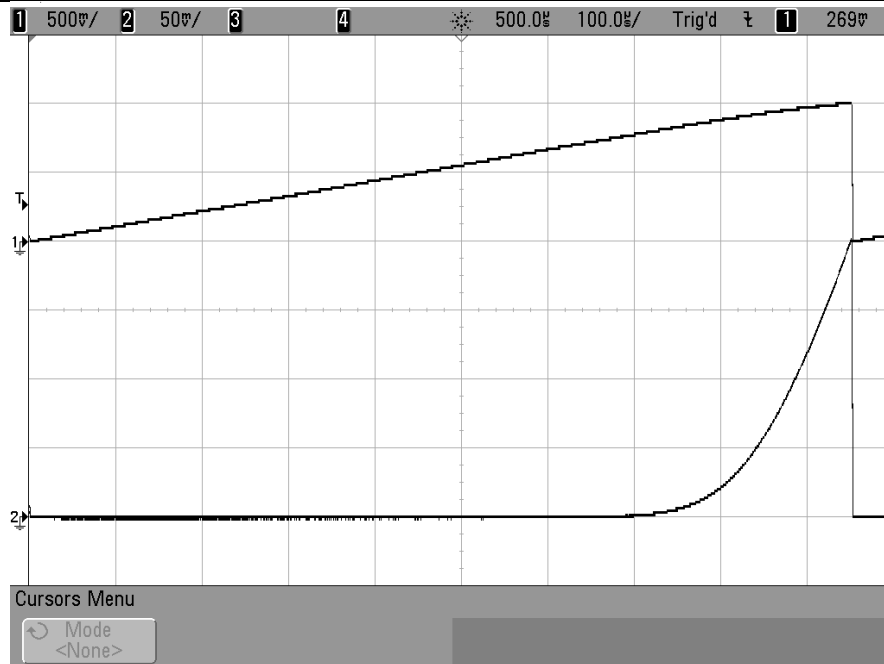


Рис. Графическое представление результатов измерений

Результаты обработки экспериментальных данных

Непосредственно в процессе облучения произошло смещение сток-затворной характеристики р-канальных транзисторов ИМС, величина которого может быть определена по исходной характеристике каждой ИМС по значению выходного тока после облучения.

Так, например, для детектора №1 для тока 2,008 мА после облучения напряжение меняется с 0,976 мВ до 1,008 мВ. Это говорит о том, что в результате облучения дозой 33,387 кРп произошел сдвиг напряжения р-канального МОП-транзистора на величину 32,0 мВ, что видно из диаграммы, представленной на рисунке 5.

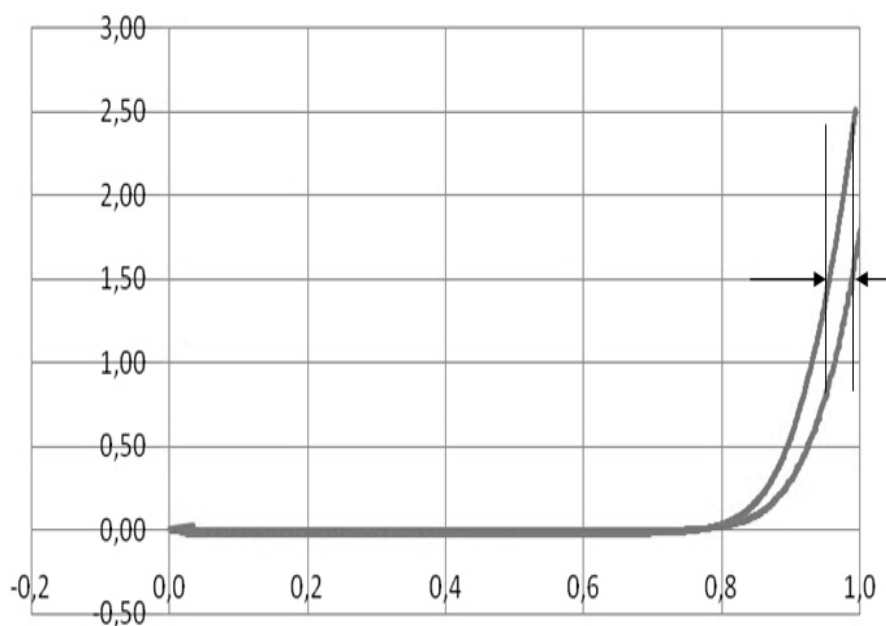


Рис. 5. Сравнение результатов измерений до (левая кривая) и после (правая) облучения для ИМС №1

Таким образом, установлено, что коэффициент чувствительности ИМС №1 составляет величину 0,954 мВ/кР.

В таблице 5 приведены результаты расчета коэффициентов чувствительности для ИМС №№ 1, 2, и 3.

Таблица 5. Значения рассчитанных коэффициентов чувствительности ИМС

Детектор	МС1	МС2	МС3
Средняя доза, кР	33,387		
Ток, мА	2,008	2,33	3,094
Напряжение до облучения, В	0,976	0,980	0,982
Напряжение после облучения, В	1,008	0,999	0,997
Смещение по напряжению, мВ	32,0	19,0	15,0
Коэффициент, мВ/кР	0,954	0,566	0,447
Средний коэффициент, мВ/кР	0,656		

Выводы

1. Выполнены измерения характеристик ИМС до и после облучения на эталонной установке ГУ-200 (НИИП, г. Лыткарино).
2. Рассчитана радиационная чувствительность трёх экземпляров ИМС.
3. Образцы ИМС подготовлены для оперативной оценки уровней нагружения объектов испытаний разработки ВНИИА.

Литература

1. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969.- 311 с.: ил.
2. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В. М. Кулаков, Е. А. Ладыгин, В. И. Шаховцев и др.; 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. Результаты применения полупроводниковых приборов для оперативной дозиметрии гамма-нейтронного излучения / А. В. Бутина // X Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Сборник тезисов. – Саров – 2012.

5. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование. Учебное пособие для вузов / Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др. Под ред. Л.А. Коледова. М.: Высшая школа, 1984 г. – 231 с.