

УДК 621.382

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОГИЧЕСКИХ КМОП ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

А.П. ЛАЗАРЬ, Ф.П. КОРШУНОВ

Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению  
П. Бровки, 19, Минск, 220072, Беларусь

Поступила в редакцию 30 января 2013

Приведено описание программного комплекса для моделирования радиационной стойкости *n*- и *p*-канальных металл-окисел-полупроводник (МОП) транзисторов – элементов комплементарных МОП интегральных микросхем. Программное обеспечение предназначено для визуализации и анализа результатов измерений вольтамперных характеристик транзисторов, экстракции SPICE-параметров и последующего моделирования их эволюции в зависимости от дозы ионизирующего излучения. Исследовано радиационное поведение МОП транзисторов – элементов микросхем 1554ЛН1 – в поле ионизирующего излучения  $Co^{60}$ .

*Ключевые слова:* *n*- и *p*-канальные МОП транзисторы, элементы КМОП интегральных микросхем, SPICE-параметры, гамма излучение, вольтамперные характеристики.

### Введение

Эксплуатация полупроводниковых приборов в условиях интенсивного радиационного фона делает актуальной задачу радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС) – базовых компонентов современной радиоэлектронной аппаратуры. Радиационные дефекты, накапливающиеся в полупроводниковых структурах при облучении, приводят к постепенной деградации электрических характеристик приборов и, в конечном итоге, к их выходу из строя. При этом представляется важным не только поиск технологических, схмотехнических или иных методов решения данной проблемы, но и способность прогнозировать поведение полупроводниковых приборов в полях ионизирующих излучений (ИИ). В данной работе представлено описание программного комплекса для моделирования радиационной стойкости элементов КМОП (комплементарных МОП) интегральных микросхем – *p*- и *n*-канальных МОП транзисторов (МОПТ). Разработанное программное обеспечение осуществляет ввод, визуализацию и последующую обработку измеренных вольтамперных характеристик (ВАХ) транзисторов с целью исследования эволюции радиационно-чувствительных SPICE-параметров приборов в зависимости от поглощенной дозы ИИ. В работе исследовано радиационное поведение МОП транзисторов микросхемы 1554ЛН1 при облучении  $\gamma$ -квантами  $Co^{60}$ .

### Описание программного комплекса

Программный комплекс функционирует под управлением операционной системы Windows 2000 и выше, имеет дружественный интерфейс и реализует выполнение следующих основных функций:

– ввод файлов данных с результатами радиационных испытаний и их графическую визуализацию. На вход можно подавать входные (стокзатворные) и выходные характеристики одного МОПТ или целой партии транзисторов, измеренные при различных поглощенных дозах ИИ;

– манипулирование данными/элементами данных, представленными на графиках: их увеличение/уменьшение, удаление/добавление, задание граничных условий для расчета анализируемых параметров;

– экстракцию набора основных SPICE-параметров МОПТ: порогового напряжения, удельной крутизны, выходного тока стока в насыщении, константы модуляции длины канала, омического сопротивления истока/стока;

– получение и визуализацию дозовых зависимостей анализируемых параметров;

– определение аналитических зависимостей параметров от поглощенной дозы;

– сохранение результатов, полученных на любом этапе анализа, на жестком диске в формате, позволяющем повторную загрузку и продолжение анализа.

На рис. 1 изображен screen-shot окна программы с исходными вольтамперными характеристиками  $n$ -МОП транзистора ИМС 1554ЛН1: входная (стокзатворная) ВАХ в степени  $1/2$  – на левой панели, выходные – на правой. Стокзатворная ВАХ измерялась при напряжении на стоке  $U_d = 5,0$  В; выходные – при напряжении на затворе в диапазоне  $U_g = 1,5 \div 5,0$  В с шагом 0,5 В. Результаты испытаний МОПТ для каждой дозы облучения расположены на отдельных закладках окна программы, что позволяет легко визуализировать весь массив экспериментальных данных и проследить эволюцию характеристик при облучении.

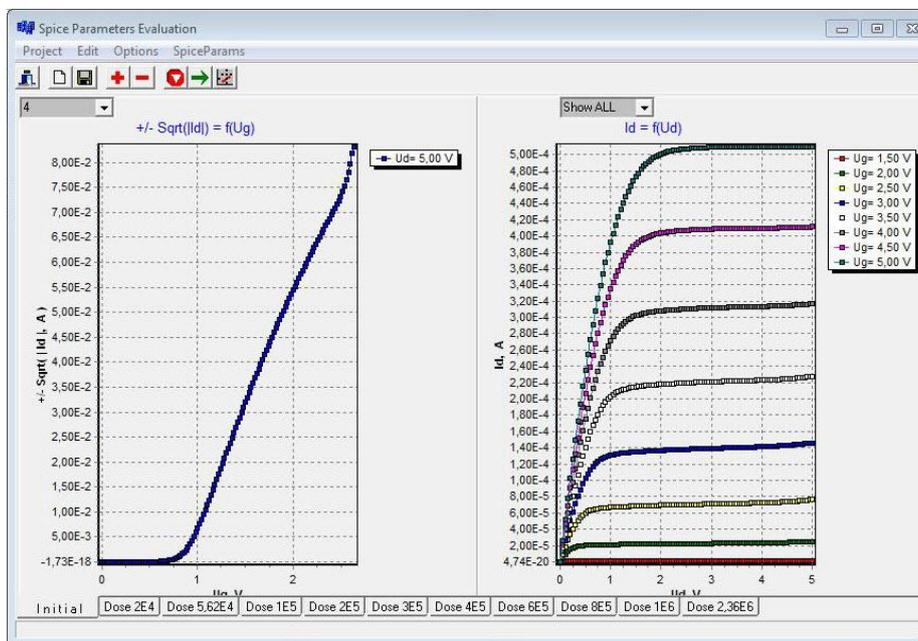


Рис. 1. Окно программы с исходными ВАХ  $n$ -МОПТ ИМС 1554ЛН1

Все наблюдаемые изменения ВАХ формально обусловлены зависимостью SPICE-параметров транзисторов от поглощенной дозы ИИ. В различных физических моделях количество таких параметров варьируется в широких пределах. Так, программный пакет BSIM 3 [1] содержит примерно 120 параметров, условно объединенных в группы (управляющие параметры, параметры для расчета по постоянному и переменному току, параметры расчета эффектов короткого канала, температурные параметры, параметры шума, параметры технологического процесса). При этом процедура оптимизации носит формальный характер и совершенно не обязательно сходится к единственному физически разумному набору значений и может давать порой физически некорректные результаты. Например, извлеченные геометрические характеристики могут зависеть от дозы ИИ. С этой точки зрения представляется целесообразным при моделировании ВАХ выделить параметры первого порядка важности, т.н. радиационно-чувствительные. Известно, например, что изменение ВАХ МОП транзисторов в результате облучения происходит в основном вследствие изменения порогового напряжения и удельной крутизны [2]. При таком подходе в качестве наиболее значимых параметров транзистора обычно выбирают длинноканальные параметры, связанные с пороговым напряжением, крутизной и подвижностью и фактором неидеальности

экспоненциальной части подпороговой характеристики [3].

Дальнейшее упрощение анализа ВАХ можно достичь, используя уравнения, описывающие не весь диапазон работоспособности прибора, а только определенный режим его работы. Так, моделируя зависимость тока стока МОПТ,  $I_d$ , от напряжения на затворе,  $U_g$ , весь диапазон изменения тока можно разбить на три области: область слабой инверсии ( $U_g < U_{th}$ ), переходная область ( $U_g \approx U_{th}$ ), область сильной инверсии ( $U_g > U_{th}$ ), где  $U_{th}$  – пороговое напряжение. В свою очередь, область сильной инверсии в зависимости от напряжения на стоке,  $U_d$ , подразделяется на две области: область триодного режима и область режима насыщения. Граница между ними задается величиной  $U_{d,sat} \approx U_g - U_{th}$ , где  $U_{d,sat}$  – граничное значение напряжения сток–исток.

Таким образом, ограничившись режимом насыщения, ток стока МОП транзистора можно описать выражением [3, 4]:  $I_d = \frac{\mu C_0 W}{2L(1+\eta)} (U_g - U_{th} - \frac{2}{3}|U_s|)^2 [1 + \lambda_m (U_d - U_{d,sat})]$ , где  $\mu$  – приповерхностная подвижность носителей заряда,  $C_0$  – удельная емкость затвор–канал,  $W$  и  $L$  – ширина и длина канала,  $U_s$  – потенциал подложки относительно истока,  $\eta$  – коэффициент влияния подложки,  $\lambda_m$  – константа модуляции длины канала. Введя обозначение для удельной крутизны  $\beta = \frac{\mu C_0 W}{L(1+\eta)}$  и полагая потенциал подложки относительно истока равным нулю, получаем выражение для тока стока в режиме насыщения:

$$I_d = \frac{\beta}{2} (U_g - U_{th})^2 [1 + \lambda_m (U_d - U_{d,sat})]. \quad (1)$$

При использовании формулы (1) для экстракции параметров транзистора следует учитывать, что напряжение на затворе  $U_g$  и напряжение, прикладываемое к соответствующему контакту транзистора  $U_G$ , связаны соотношением  $U_G = U_g + I_d R_s$ , где  $R_s$  – сопротивление истока.

Для адекватного выбора типа аналитической регрессии экспериментальных данных необходимо определить основные факторы, определяющие изменения анализируемых параметров. Известно, что при воздействии ИИ пороговое напряжение МОП транзисторов изменяется вследствие двух основных процессов: накопления положительного заряда в объеме подзатворного диэлектрика и изменения заряда поверхностных состояний (ПС) на границе раздела диэлектрик–полупроводник [5]. Положительный заряд, накапливаемый в подзатворных слоях, способствует индуцированию электронов в канале  $n$ -МОП транзистора при меньших напряжениях на затворе. Этот же положительный заряд в транзисторах с  $p$ -каналом, наоборот приводит к обеднению канала от дырок, поэтому пороговое напряжение тоже смещается в сторону отрицательных значений, но уже возрастая по абсолютной величине. Данный процесс доминирует на первоначальных этапах облучения. При дальнейшем увеличении дозы характер изменения  $\Delta U_{th}$  все более определяется вторым процессом: накоплением заряда поверхностными состояниями на интерфейсе – положительного для  $p$ -канальных транзисторов и отрицательного для  $n$ -канальных. Различие в знаке заряда ПС вносит асимметрию в характер изменения  $\Delta U_{th}$ . В случае  $p$ -МОП транзисторов положительный заряд ПС суммируется с положительным зарядом в объеме диэлектрика, что приводит к монотонному сдвигу ВАХ в сторону отрицательных значений. Для  $n$ -МОПТ заряды вычитаются, и уменьшение порогового напряжения сменяется ростом.

Таким образом, эффективное изменение порогового напряжения МОП-транзисторов можно описать в виде суммы двух слагаемых:  $\Delta U_{th} = \Delta U_{th}^{vol} + \Delta U_{th}^{int}$ , где первое слагаемое обусловлено процессом накопления заряда в объеме подзатворного диэлектрика, второе – на ПС интерфейса диэлектрик–полупроводник.

В литературе [3] присутствуют выражения различной степени сложности, описывающие вклад каждого члена. Полагая, что заряд ПС пропорционален их плотности, для каждого из слагаемых можно использовать экспоненциальные выражения [6]:

$$\Delta U_{th}(D) = \Delta U_{vol}^{sat} (\exp(-D / D_{vol}) - 1) + \Delta U_{int}^{sat} (\exp(-D / D_{int}) - 1), \quad (2)$$

где  $\Delta U_{vol}^{sat}$  и  $\Delta U_{int}^{sat}$  – изменения порогового напряжения в насыщении, обусловленные объемными и интерфейсными эффектами,  $1/D_{vol}$  и  $1/D_{int}$  – скорости соответствующих процессов (Мрад<sup>-1</sup>).

Поверхностные состояния, образующиеся при облучении, помимо вклада в сдвиг порогового напряжения, приводят к дополнительному рассеянию носителей заряда в приповерхностной области полупроводника, тем самым уменьшая их подвижность и, как следствие, крутизну стокзатворной характеристики МОП транзистора. Исходя из дозовой зависимости для плотности ПС [5, 6],  $N_{int}(D) = N_{int}^{sat} (1 - \exp(-D / D_{int}))$ , где  $N_{int}^{sat}$  – плотность поверхностных состояний в насыщении, и соотношения для подвижности носителей заряда

$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \gamma N_{int}^{sat}}$ , где  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности,  $\mu_0$  и  $\mu$  – значения удельной крутизны

до и после облучения, получаем следующие выражение для дозовой зависимости удельной крутизны МОП транзистора:

$$\beta(D) = \frac{\beta_0}{1 + \gamma N_{int}^{sat} (1 - \exp(-D / D_{int}))}, \quad (3)$$

где  $\beta_0$  – начальное значение удельной крутизны.

Аналитические выражения (2) и (3) использовались далее в программе при регрессии дозовых зависимостей порогового напряжения и удельной крутизны МОП-транзисторов.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В данном разделе приведены результаты исследования эволюции порогового напряжения и удельной крутизны *p*-МОП и *n*-МОП транзисторов ИМС 1554ЛН1 при облучении. Результаты получены на основе анализа измеренных ВАХ тестовых транзисторов с помощью разработанного программного обеспечения.

Облучение МОПТ  $\gamma$ -квантами  $Co^{60}$  проводилось в пассивном режиме на установке «Исследователь» при комнатной температуре в диапазоне доз 0; 0,02; 0,056; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 и 2,36 Мрад. Мощность экспозиционной дозы гамма-излучения составляла 30 рад/с. ВАХ транзисторов до и после облучения измерялись с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6.

На рис. 2 показаны характерные изменения стокзатворных характеристик транзисторов в процессе облучения. По осям *X* отложено напряжение на затворе, по осям *Y* – ток стока. Общим в характере изменения ВАХ является смещение кривых в сторону отрицательных напряжений по оси *X* и в сторону положительных токов по оси *Y*, что соответствует отрицательному сдвигу пороговых напряжений транзисторов. Данный эффект приводит к тому, что с ростом дозы при фиксированном напряжении на затворе происходит уменьшение модуля тока стока *p*-канальных транзисторов и увеличение модуля тока стока *n*-канальных. Изменения ВАХ *p*-МОПТ имеют монотонный характер, а в случае *n*-МОПТ – немонотонный: ток стока сначала растет, достигая максимальных значений при дозе  $D = 0,6$  Мрад, затем с увеличением дозы начинает уменьшаться (на графиках для наглядности показаны не все экспериментальные точки и промежуточные дозы). Данные выводы носят предварительный характер. Для проведения дальнейшего анализа из измеренных ВАХ извлекались SPICE-параметры транзисторов и исследовалась их эволюция при облучении.

На рис. 3 представлены дозовые зависимости изменения порогового напряжения,  $\Delta U_{th} = U_{th}(D) - U_{th0}$ , *p*-МОП и *n*-МОП транзисторов. Как и предполагалось, для транзисторов обоих типов наблюдается смещение рабочей точки в сторону отрицательных значений. Исходные значения пороговых напряжений примерно равны по абсолютной величине, – 0,9583 В для *p*-МОПТ и 0,9174 В для *n*-МОПТ, а максимальный сдвиг пороговых напряжений составил примерно 0,6 В и 0,3 В, соответственно. В случае *n*-МОП транзисторов дозовая зависимость носит немонотонный характер. Начиная с дозы 0,5 Мрад наблюдается небольшой подъем порогового напряжения.

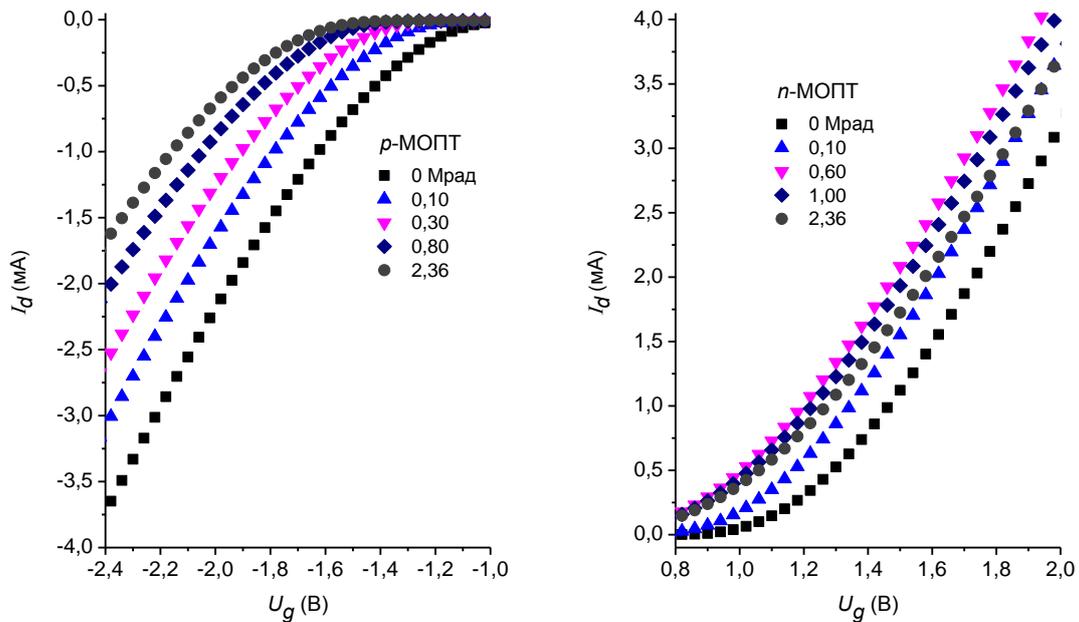


Рис. 2. Изменения стокзатворной характеристики  $p$ -МОП и  $n$ -МОП транзисторов ИМС 1554ЛН1 при облучении  $\gamma$ -квантами  $\text{Co}^{60}$ .

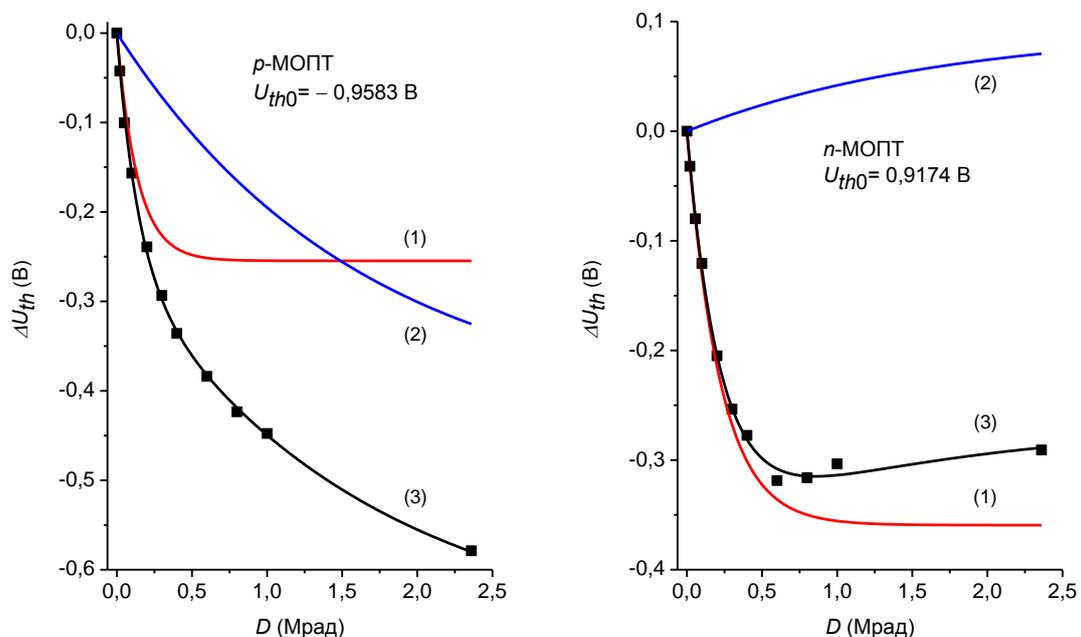


Рис. 3. Изменения порогового напряжения  $p$ -МОП и  $n$ -МОП транзисторов ИМС 1554ЛН1 при облучении  $\gamma$ -квантами  $\text{Co}^{60}$ : 1 – вклад объемных эффектов; 2 – интерфейсных; 3 – суммарный.

На рис. 4 показаны дозовые зависимости удельной крутизны МОПТ. В результате воздействия  $\gamma$ -излучения происходит значительное уменьшение крутизны транзисторов, обусловленное изменениями подвижности носителей заряда. Крутизна  $n$ -канальных транзисторов спадает примерно в 2 раза быстрее. Существенное отличие начальных значений для  $n$ -МОП и  $p$ -МОП транзисторов, 6,4 и 4,0  $\text{mA/V}^2$ , находится в соответствии с подвижностью электронов и дырок в  $n$ - и  $p$ -кремнии при концентрации легирующей примеси  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ :  $1200 \div 1450$  и  $500 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Примерно до дозы 0,1 Мрад уменьшение крутизны транзисторов носит немонотонный характер (эффект малых доз [6]).

Для регрессии дозовых зависимостей порогового напряжения и удельной крутизны МОП транзисторов использовались выражения (2) и (3), соответственно. Полученные подгоночные параметры приведены в таблице, результаты обработки данных показаны на рис. 3 и 4 гладкими кривыми. Кривая (1) на рис. 3 относится к процессу накопления заряда в объеме

диэлектрика, (2) – заряда на интерфейсе диэлектрик–полупроводник. При начальных дозах облучения (примерно до 0,6 Мрад) преобладают объемные процессы, при дальнейшем увеличении дозы – поверхностные. Деграция удельной крутизны транзисторов обусловлена процессами на интерфейсе.

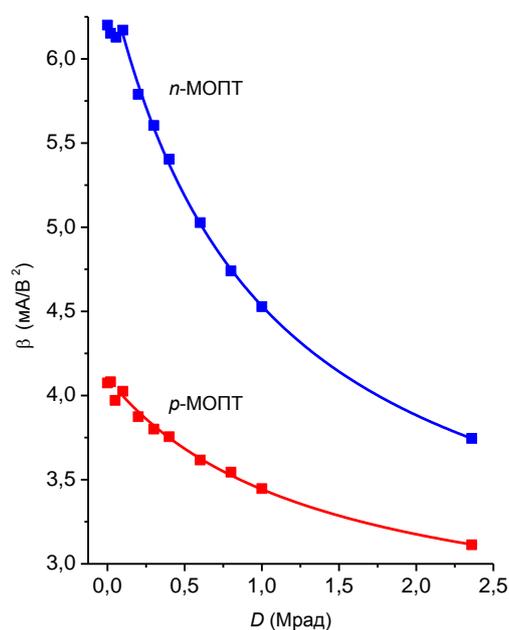


Рис. 4. Дозовая зависимость удельной крутизны  $p$ -МОП и  $n$ -МОП транзисторов ИМС 1554ЛН1 при облучении  $\gamma$ -квантами  $Co^{60}$

**Параметры аналитической регрессии дозовых зависимостей порогового напряжения и удельной крутизны МОП транзисторов ИМС 1554ЛН1**

	$U_{th0}, В$	$\Delta U_{vol}^{sat}, В$	$\Delta U_{int}^{sat}, В$	$D_{vol}, Мрад$	$D_{int}, Мрад$	$\beta_0, мА/В^2$	$\gamma N_{int}^{sat}$
$p$ -МОПТ	-0,9583	0,2546	0,4251	0,1368	1,628	4,08	0,4060
$n$ -МОПТ	0,9174	0,3594	-0,0944	0,2199	1,709	6,48	0,9737

Полученные данные предоставляют возможность оценить количественно вклад различных механизмов в деграцию порогового напряжения МОП-транзисторов при облучении. Видно, что для  $p$ -канальных транзисторов доминирующим является процесс накопления поверхностного заряда на интерфейсе, в то время как для  $n$ -канальных – основной вклад в изменение порогового напряжения дает накопление объемного заряда в подзатворном диэлектрике. Этот вывод может служить ориентиром при разработке путей повышения радиационной стойкости транзисторов. Отметим и существенную разницу в скоростях этих двух процессов. Соответствующие константы,  $D_{vol}$  и  $D_{int}$ , отличаются примерно на порядок.

**Заключение**

Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять обработку результатов радиационных испытаний МОП транзисторов в полях стационарных ионизирующих излучений. Радиационно-чувствительные параметры транзисторов экстрагируются из измеренных входных и выходных вольтамперных характеристик и усредняются по произвольной выборке испытуемых приборов, что позволяет повышать статистическую достоверность получаемых результатов. Установленные дозовые зависимости подвергаются аналитической регрессии на основе моделей, учитывающих процессы накопления заряда в объеме подзатворного диэлектрика транзистора и на поверхностных состояниях на границе раздела диэлектрик-полупроводник. Полученные аналитические выражения позволяют разделить и оценить вклады этих двух процессов, определить их скорости, и на этом пути наметить пути повышения радиационной стойкости приборов.

Определение аналитического вида дозовых зависимостей позволяет прогнозировать радиационное поведение МОП транзисторов в полях ионизирующих излучений.

Программное обеспечение было использовано для исследования радиационной стойкости *p*- и *n*-канальных МОП транзисторов ИМС 1554ЛН1 при облучении  $\gamma$ -квантами  $\text{Co}^{60}$  в диапазоне доз 0÷2,4 Мрад. Установлено, что для *p*-канальных транзисторов определяющим фактором деградации порогового напряжения является накопление заряда на поверхностных состояниях, в то время как для *n*-канальных – в объеме диэлектрика. И в том и в другом случае скорости этих двух процессов различаются на порядок. При начальных дозах облучения (примерно до 0,6 Мрад) преобладают объемные процессы, при дальнейшем увеличении дозы – поверхностные. Деградация удельной крутизны транзисторов обусловлена процессами на интерфейсе (возрастающим рассеянием носителей заряда), и в рассмотренном диапазоне доз определяется в основном изменением подвижности носителей заряда в приповерхностной области полупроводника. Примерно до дозы 0,1 Мрад изменение крутизны транзисторов носит немонотонный характер (проявление эффекта малых доз).

*Авторы выражают признательность Ластовскому С.Б. за помощь при облучении ИМС и Карасю В.И. за проведение измерений ВАХ транзисторов. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект № Ф12СО-027).*

## **RADIATION RESISTANCE SIMULATION OF LOGICAL CMOS INTEGRATED CIRCUITS ELEMENTS**

A.P. LAZAR, F.P. KORSHUNOV

### **Abstract**

The software to simulate radiation resistance of MOSFET transistors, the basic elements of CMOS integrated circuits, is presented. The software performs visualization and analysis of volt-ampere characteristics of *p*- and *n*-channel transistors, extraction of «radiation sensitive» SPICE parameters and modeling of their variations with an ionizing radiation. The degradation of MOSFET transistors of the 1554LN1 microcircuit is investigated for gamma  $\text{Co}^{60}$  irradiation.

### **Список литературы**

1. Cheng Y., Chan M., Hui R. et al. BSIM3v3 Manual. 1996.
2. Третьяченко Т.И., Ватутина К.С., Горбунов М.С. и др. // Сб.: Научная сессия МИФИ. 2006. Т. 16. С. 73–74.
3. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Вавилов В.А. Воздействие радиации на интегральные микросхемы. Минск, 1986.
4. Guvench M.G. // Proc. of ASEE. 1994. Vol. 1. P. 879–884.
5. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП ИС. М., 1994.
6. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М., 1988.