

Измерения электрических характеристик биполярных и МОП-транзисторов под действием радиации

К. О. ПЕТРОСЯНЦ^{1, 2}, Л. М. САМБУРСКИЙ^{1, 2}, И. А. ХАРИТОНОВ¹, М. В. КОЖУХОВ¹

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Московский институт электроники и математики),
Москва, Россия, e-mail: kpetrosyants@hse.ru

² Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия

Рассмотрена специфика измерений электрических характеристик биполярных и МОП-транзисторов, подвергнутых воздействию нейтронного, электронного и γ -излучений. Разработана автоматизированная система измерений. Приведены примеры использования этой системы для исследования радиационной стойкости транзисторов и определения параметров SPICE-моделей для расчёта схем.

Ключевые слова: биполярные транзисторы, МОП-транзисторы, воздействие радиации, SPICE-модели.

In this paper we analyze details of bipolar transistors and MOSFETs electrical characteristics measurement in the presence of neutron, electron and gamma irradiation. An automated measurement subsystem is developed with its core being a measurement kernel comprising a set of measurement instrumentation as well as methods of measurement and data processing for irradiated transistors of various types. Provided are several examples of the subsystem application to BJTs and MOSFETs radiation hardness investigation as well as extraction of their SPICE model parameters for circuit design.

Key words: bipolar transistors, MOSFETs, radiation influence, SPICE-models.

Измерение характеристик и определение параметров компонентов является обязательным этапом, сопровождающим процесс проектирования и разработки радиоэлектронной аппаратуры [1—5]. Методы измерения характеристик и определения параметров моделей компонентов для симуляторов электронных схем, т. е. для так называемых SPICE-моделей биполярных и МОП-транзисторов, эксплуатируемых в нормальных условиях, в достаточной степени разработаны и унифицированы. Однако этого нельзя сказать о приборах, входящих в аппаратуру, подверженную воздействию внешних факторов, в частности радиации. Традиционные области применения такой аппаратуры — аэрокосмические аппараты, системы управления объектами атомной энергетики, измерительные системы для исследования высокоэнергетических ядерных частиц и физических процессов, радиационная медицина, военная техника и др. В последние годы наблюдается заметный прогресс в таких областях, как космическая связь и телекоммуникации, дистанционное зондирование Земли.

Электронные составляющие перечисленных систем подвергаются влиянию различных видов радиационного излучения, которые могут вызывать деградацию электрических параметров: γ -квантов, нейтронов, электронов, протонов, отдельных высокоэнергетических ядерных частиц. Такая деградация снижает надёжность и долговечность работы аппаратуры и может привести к сбоям и (или) отказам.

Для определения радиационной стойкости компонентов проводят специальные испытания в наземных условиях. Для каждого вида радиации устанавливают набор значений дозы, энергии или интенсивности потока излучения, для которых необходимо определить реакцию прибора.

Под действием радиации процесс измерений существенно усложняется. Во-первых, добавляется испытательное и измерительное оборудование, реализующее процедуру ра-

диационного облучения, а методики проведения эксперимента и измерений специфичны, а в ряде случаев уникальны. Во-вторых, резко увеличивается объём измерений электрических характеристик, так как требуются многократные измерения для каждой дозы, энергии или интенсивности конкретного вида воздействия. Видов воздействия радиации может быть несколько, поскольку в процессе эксплуатации в космических условиях они, как правило, действуют одновременно. В-третьих, существенно возрастает сложность как SPICE-моделей, описывающих приборы с учётом радиационных эффектов, так и процедуры экстракции их параметров из результатов измерений. В-четвертых, становится затруднительной обработка результатов измерений. В-пятых, в процессе принятия решения о функциональной пригодности прибора в реальных условиях эксплуатации вводится дополнительный критерий оценки — степень деградации его параметров в условиях действия радиационных факторов.

В настоящее время при проведении измерений электрических характеристик биполярных и МОП-транзисторов в процессе или после их облучения не существует единых, типовых, отработанных методик. Такая же ситуация наблюдается в вопросе экстракции SPICE-параметров схемотехнических моделей транзисторов для использования в системах автоматизированного проектирования радиационно-стойких электронных компонентов и устройств.

В существующих публикациях для каждого типа приборов и условий их практического применения в аппаратуре задачи измерения характеристик и определения параметров SPICE-моделей решаются самостоятельно [5—10]. Используемые при этом измерительные средства и методики детально не раскрываются, а в ряде случаев являются тщательно охраняемыми фирменными секретами. Приводимые

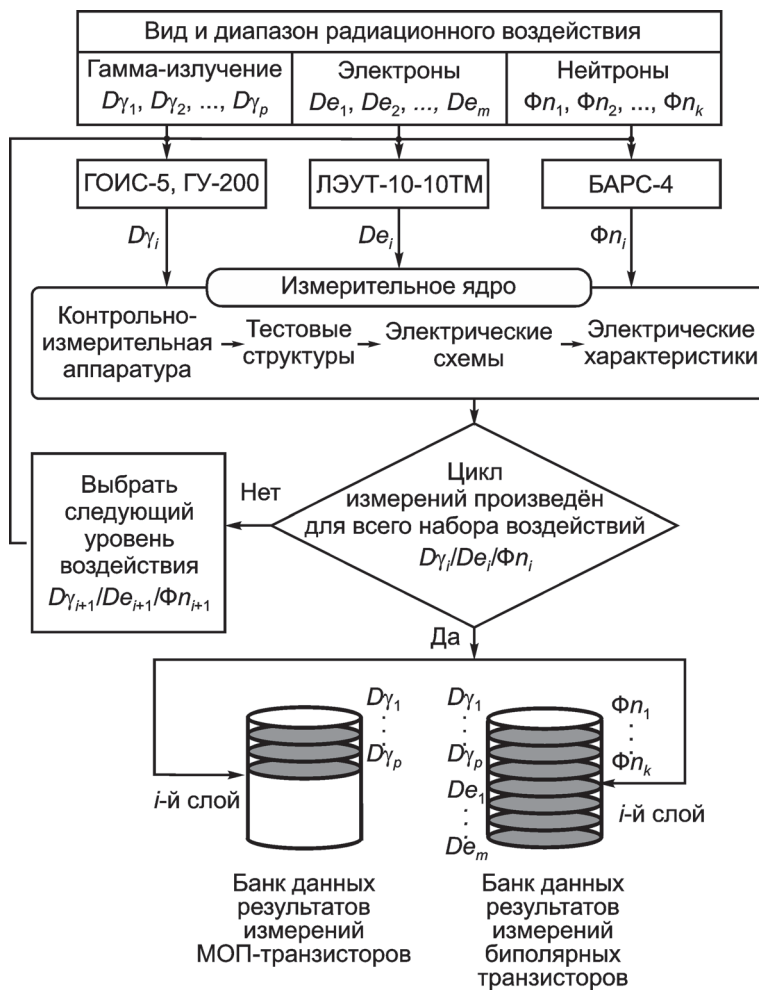


Рис. 1. Блок-схема автоматизированных измерений электрических характеристик биполярных и МОП-транзисторов до, в процессе и после радиационного воздействия

в различных работах результаты аналогичных экспериментов существенно различаются.

В настоящей работе авторы формализовали и унифицировали процедуру измерений электрических характеристик биполярных и МОП-транзисторов, подверженных воздействию различных видов радиации.

Блок-схема проведения эксперимента. Для проведения экспериментальных исследований влияния γ -, электронного и нейтронного излучений на биполярные и МОП-транзисторы используют единый подход, блок-схема которого представлена на рис. 1. В его основу положено общее для всех типов транзисторов и видов радиации измерительное ядро, в структуру которого входят: аппаратно-программный измерительный комплекс с набором стандартных измерительных приборов; специальным образом подобранные тестовые биполярные и МОП-транзисторы; перечни вольт-амперных и других характеристик, учитывающих специфику транзисторов различных типов; типовые методики измерений их характеристик и процедуры обработки результатов; набор SPICE-моделей транзисторов, рассчитанных на определенный вид радиационного воздействия (нейтроны, электроны, γ -кванты и др.).

В процессе работы осуществляется автоматическое многократное обращение к измерительному ядру, в результате чего упрощается процедура и сокращается время измерений, а также исключается возникновение ошибок, вызванных человеческим фактором.

Набор контрольно-измерительных приборов, работающих под управлением программного обеспечения компьютера (управляющей среды LabView и отдельных макросов), содержит: источник-измеритель Keithley 2602 для измерений статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) малой и средней мощности; осциллограф Tektronix DPO 7254; генератор ГСС-120; а также отдельные источники питания и мультиметры для определения импульсных характеристик средней и большой мощности; измеритель иммитанса Е7-12 для определения ёмкостных характеристик. Возможно использование и других типов устройств с аналогичными или более высокими метрологическими параметрами, в частности приборов Agilent и др. Все перечисленные приборы подключены к ЭВМ по стандартным интерфейсам GPIB, USB, RS-232. Исходными данными для работы системы, задаваемыми оператором, являются тип тестового транзистора, максимально допустимые значения силы тока, напряжения, мощности, а также набор дискретных значений радиационного фактора, по достижении которых необходимо провести комплекс измерений.

Характеристики биполярных и МОП-транзисторов обычно измеряют на партии из 5—20 транзисторов, подвергаемых радиационному воздействию. Тестовые транзисторы могут быть расположены на полупроводниковых пластинах или собраны в корпуса. Измерение их характеристик проходит непосредственно перед облучением, в процессе и по истечении одного часа после облучения. Предпочтительно использовать четырёхпроводный метод, при котором подача и измерение напряжения происходит по отдельным парам проводов [11].

Для биполярных транзисторов измеряют прямые и обратные входные и выходные характеристики, сопротивления эмиттера и коллектора методом flyback, ёмкостные характеристики. Для СВЧ-транзисторов помимо перечисленных определяют максимальную и граничную частоты, а также S-параметры. Для МОП-транзисторов измеряют сток-затворную и выходную характеристики, токи утечки, ёмкостные и импульсные характеристики и др.

Описание эксперимента. Радиационную стойкость и экстракцию параметров SPICE-моделей биполярных транзисторов для последующего схемотехнического моделирования определяют, как правило, для нейтронного и электронного излучений (или эквивалентного ему γ -излучения). В МОП-транзисторах для этих целей обычно используют только γ -излучение.

Облучение нейтронами. Биполярные и МОП-транзисторы облучали нейтронами на импульсном ядерном реакторе БАРС-4 с энергией 1,25 МэВ в Научно-исследовательском институте приборов. Реактор имеет металлическую активную зону, которая используется как интенсивный источник γ - и нейтронного излучений для исследований радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры. Средняя мощность реактора 1 кВт, пиковая мощность в импульсе $1,4 \cdot 10^8$ кВт. Биполярные транзисторы облучали дискретным набором потоков нейтронов Φ_{ni} в диапазоне 10^{12} — 10^{14} см $^{-2}$. Погрешность измерений потока нейтронов составила не бо-

более 15 %. Так как после облучения остаётся наведённая активность на образцах и в помещении, где установлен реактор, после очередного цикла у исследователей нет возможности делать необходимые измерения непосредственно на месте. Следовательно, из соображений безопасности приходится проводить измерения дистанционными методами (с расстоянием от средств измерений до образцов не менее 20 м) или располагать измерительную аппаратуру рядом с образцами, что требует дистанционного управления. Чрезмерное увеличение расстояния приводит к дополнительным потерям в проводах, паразитным наводкам и снижает точность измерений.

С учётом заданного значения потока нейтронов заранее фиксируют моменты времени, соответствующие определённому набору контрольных уровней излучения Φ_{ni} . После каждого i -го облучения приборов нейтронами с конкретным значением потока Φ_{ni} эти приборы поступают в измерительное ядро, в котором для них измеряют необходимый набор электрических характеристик. На последующем $(i+1)$ -м шаге облучения с новым значением потока Φ_{ni+1} приборы опять поступают в измерительное ядро. Процедура повторяется k раз (k — количество дискретных значений потока Φ_n , для которых проводилось облучение).

Облучение электронами. Биполярные и МОП-транзисторы облучали электронами на линейном ускорителе электронов ЛЭУТ-10-10ТМ в Институте физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина. Средняя энергия пучка электронов этого ускорителя 7,5 МэВ, средний ток 1,2 мА. Дозиметрию проводили с использованием цилиндра Фарадея, установленного на задней стенке крепления. Приборы облучали электронами для дискретного набора доз D_{ei} в диапазоне 10^4 — 10^7 рад. Погрешность дозиметрии не превышала 20 %. Характеристики приборов после облучения электронами измеряли по аналогии с нейтронами. Процедуру повторяли m раз для дискретных значений суммарных доз D_{ei} .

Облучение γ -квантами. Биполярные и МОП-транзисторы облучали γ -квантами в ОАО «НПП Пульсар» на установке ГОИС-5 (γ -облучатель интегральных схем). Мощность дозы облучения образцов 42 рад/с (H_2O), энергия γ -квантов 0,661 МэВ. Активным элементом в установке ГОИС-5 является изотоп Cs. Погрешность дозиметрии на установке ГОИС-5 составила менее 10 %. Облучение приборов γ -квантами проводили для дискретного набора доз $D_{\gamma i}$ в диапазоне 10^4 — 10^6 рад. Характеристики приборов после облучения γ -квантами измеряли p раз для дискретных значений суммарной дозы $D_{\gamma i}$.

После облучения γ -квантами и электронами с энергией 7,5 МэВ на образцах отсутствует наведённая активность. Поэтому характеристики образцов можно измерять при коротких кабелях. Однако если требуется проведение испытаний в активном режиме, необходимо также учитывать влияние сопротивлений проводов (кабелей) на характеристики биполярных и МОП-транзисторов [11].

Автоматизация эксперимента. По сравнению с нормальными условиями, когда проводится только один цикл измерений характеристик, для каждого биполярного или МОП-транзистора, подвергнутого воздействию одного из трёх видов радиационного облучения, требуется проведение k , m , или p циклов измерений, что существенно увеличивает объём измерений. Этот объём ещё более возрастёт, если исследовать приборы, облучённые несколькими видами радиаци-

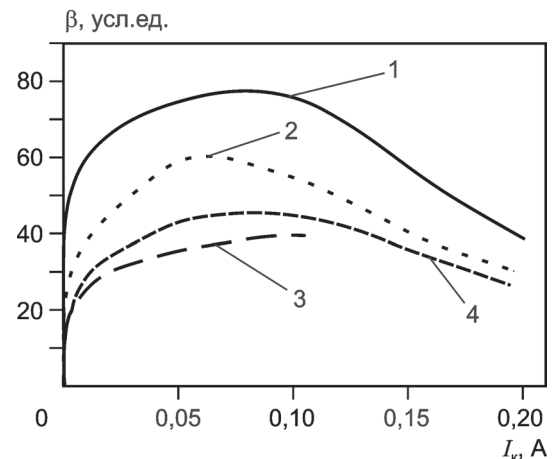


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления по току биполярных $n-p-n$ -транзисторов 2Т378 от тока коллектора:

1 — до радиационного воздействия; 2, 3, 4 — после воздействия γ -излучения дозой $1 \cdot 10^5$ рад; нейтронного потока $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; электронного излучения дозой $1 \cdot 10^5$ рад, соответственно

онных частиц. Поэтому в процессе измерений автоматизация используется на двух уровнях:

«внутреннем» (измерительное ядро), где по заданной программе без участия оператора определяются необходимые характеристики тестового прибора в имеющихся условиях;

«внешнем», где происходит централизованное управление облучающей установкой, а в заданные моменты времени циклически запускается измерительное ядро для набора уровней радиационного воздействия; выполняется сбор, объединение и предварительный анализ данных с каждой итерации; приближённо оценивается деградация основных параметров тестового элемента; данные измерений переформируются в соответствии с требованиями программы экстракции параметров SPICE-моделей [9].

Автоматизация на внутреннем уровне позволяет сократить время измерений в десятки раз по сравнению с ручными измерениями [9], снизить вероятность ошибки оператора и повреждения тестового образца в результате устранения лишних переключений выводов. Автоматизация на внешнем уровне позволяет заметно (на 30—40 %) сократить время обработки и переформатирования данных измерений, более точно определить моменты запуска измерительного ядра, а также проводить локальные (*in situ*) измерения с дистанционным управлением в условиях повышенной радиации.

Результаты эксперимента. Биполярные транзисторы. При выборе типа биполярного транзистора для использования в электронной аппаратуре специального назначения необходима оценка воздействия различных видов радиации на степень деградации электрических параметров транзистора.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты измерений ВАХ трёх одинаковых образцов биполярного транзистора типа 2Т378 после облучения потоком нейтронов $\Phi_n = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, электронами с дозой $D_e = 10^5$ рад и γ -квантами с дозой $D_\gamma = 10^5$ рад. Энергетические характеристики всех трёх видов облучения эквивалентны. Самое негативное воздействие оказывают нейтроны, после облучения которыми наблюдается наибольший спад коэффициента усиления по току β .

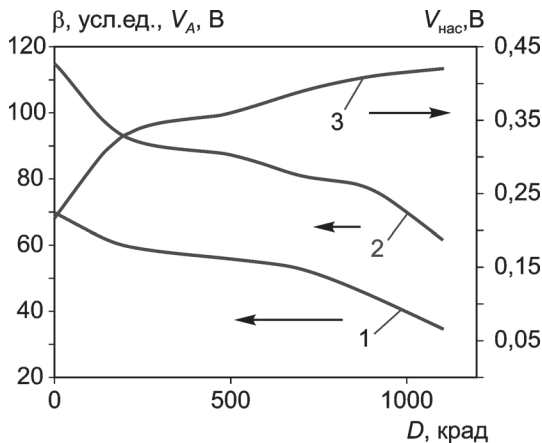


Рис. 3. Зависимости напряжения Эрли V_A (1), коэффициента усиления по току β (2) и напряжения насыщения $V_{нас}$ (3) от поглощённой дозы электронного излучения для интегрального биполярного $n-p-n$ -транзистора

Стойкость биполярных транзисторов к различным видам радиационного воздействия оценивают по уровню, при котором коэффициент усиления по току β спадает до 40—50 единиц. Уровень устанавливается, исходя из требований аналоговой и аналого-цифровой схемотехники при условии, что все остальные параметры находятся в допустимых пределах.

Пример обработки результатов измерений характеристик биполярного $n-p-n$ -транзистора интегральной схемы операционного усилителя, изготовленного в ОАО «НПП «Пульсар» [12], после облучения электронами в диапазоне доз до 1,1 Мрад приведён на рис. 3. Все параметры, такие как коэффициент усиления β , напряжение Эрли V_A и напряжение насыщения $V_{нас}$ существенным образом деградируют. Для уровня облучения с дозой 1,0 Мрад коэффициент усиления по току β и напряжение Эрли V_A уменьшаются примерно в два раза, но при этом транзистор сохраняет работоспособность для аналоговых применений. Напряжение $V_{нас}$ наоборот увеличивается почти в два раза, повышая тем самым уровень логического нуля для цифровых схем $V_{лог}^0 = V_{нас}$. Тем не менее до уровня облучения 1,0 Мрад значение $V_{лог}^0$ находится в допустимых пределах для цифровых схем.

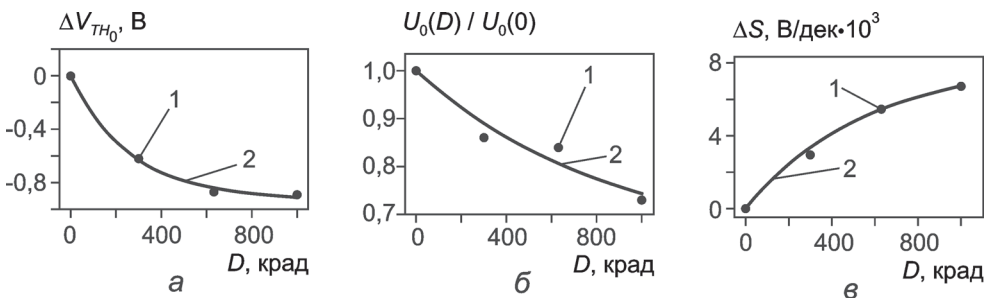


Рис. 4. Дegrадация параметров МОП-транзисторов с увеличением дозы γ -излучения при изменении порогового напряжения $\Delta V_{TH0}(D)$ (а); подвижности в слабых полях $U_0(D)/U_0(0)$ (б); предпорогового размаха сток-затворной характеристики ΔS (в):
1 — измеренные значения; 2 — аппроксимирующие функции, построенные по SPICE-модели

Радиационные зависимости параметров β , V_A на рис. 3 аппроксимируются аналитическими функциями

$$1/\beta(D) = 1/\beta(0) + K_\beta D;$$

$$V_A(D) = V_A(0) + K_A D,$$

где K_A , K_β — подгоночные коэффициенты.

Помимо этих параметров важнейшей характеристикой, отражающей радиационную чувствительность биполярного транзистора, является ВАХ для радиационно-индуцированного тока базы [5], которая включает две составляющие, обусловленные соответственно объёмной и поверхностной рекомбинацией:

$$\Delta I_b(D) = I_{s1}(1 + K_1 D) \{ \exp [U_{бэ}/(n_{e1} \varphi_T)] - 1 \} + I_{s2}(1 - \exp [-K_2 D]) \{ \exp [U_{бэ}/(n_{e2} \varphi_T)] - 1 \},$$

где I_{s1} , n_{e1} , I_{s2} , n_{e2} — параметры, определяемые из результатов исследований для необлучённого транзистора; K_1 , K_2 — подгоночные коэффициенты, установленные из экспериментальных ВАХ облучённого транзистора; $U_{бэ}$ — напряжение база-эмиттер; φ_T — температурный потенциал.

Приведённые выше зависимости включены в стандартные версии SPICE-моделей биполярных транзисторов, применяемых для расчёта схем с помощью систем автоматизированного проектирования. Для определения параметров SPICE-модели биполярного транзистора использовали разработанную оптимизационную процедуру по критерию минимума средней квадратической ошибки, реализованную в программном комплексе IC-CAP [9]. Список параметров SPICE-модели биполярных транзисторов при этом увеличивается на 8 параметров: K_β , K_A , I_{s1} , I_{s2} , n_{e1} , n_{e2} , K_1 , K_2 .

МОП-транзисторы. Для МОП-транзисторов основные параметры, зависящие от радиации, — пороговое напряжение, подвижность носителей заряда в канале, предпороговый размах сток-затворной характеристики и ток утечки стока. Из трёх видов радиационного воздействия (нейтроны, электроны, γ -кванты) наибольшая деградация параметров МОП-транзисторов наблюдается при воздействии γ -излучения.

На рис. 4 показаны радиационные зависимости изменений основных параметров модели: порогового напряжения $\Delta V_{TH0}(D)$, подвижности в слабых полях $U_0(D)/U_0(0)$ и предпорогового размаха сток-затворной характеристики $S = \Delta U_{зи}/\Delta \lg I_c$ ($\Delta U_{зи}$ — изменение напряжения затвор-исток; $\Delta \lg I_c$ — соответствующее изменение логарифма тока стока транзистора) для набора n -канальных МОП-транзисторов, изготовленных по комбинированной МОП-технологии XFAB 1 мкм. Транзисторы имеют структуру КНИ («кремний на изоляторе») и различную ширину W и длину L каналов (большой канал $W/L = 18/18$ мкм, короткий $W/L = 12/1$ мкм, узкий $W/L = 3/18$ мкм, наименьший $W/L = 3/1$ мкм) [14].

Транзисторы облучали в диапазоне доз 0—1 Мрад без смещения на подложке и рабочей области. Для

каждой заданной дозы измеряли сток-затворную и выходную ВАХ, на основании которых рассчитывали радиационно-зависимые параметры их SPICE-модели, приведённые в таблице.

Основные параметры SPICE-модели МОП-транзисторов для различных доз γ -излучения

Параметры SPICE-модели	Доза, крад			
	0	300	600	1000
V_{TH0}	1,5750	0,9559	0,7066	0,6816
V_{OFF}	-0,0964	-0,1296	-0,1322	-0,1334
C_{IT}	0	$7,05 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,62 \cdot 10^{-4}$
U_0	533,7	459,5	448,8	387,3
U_A	$-9,35 \cdot 10^{-10}$	$-1,92 \cdot 10^{-10}$	$-6,92 \cdot 10^{-11}$	$-5,27 \cdot 10^{-11}$
U_B	$9,60 \cdot 10^{-18}$	$7,20 \cdot 10^{-18}$	$6,42 \cdot 10^{-18}$	$6,32 \cdot 10^{-18}$

На основании табличных данных для каждого из параметров (V_{TH0} , V_{OFF} , C_{IT} , U_0 , U_A , U_B) построили аппроксимирующие функции вида $a_i [1 - \exp(-b_i D)]$ и (или) $a_i + b_i D + c_i D^2$ (a_i , b_i , c_i — подгоночные коэффициенты), которые включены в SPICE-модель МОП-транзистора [13]. Погрешность моделирования ВАХ не превысила 15—20 % (см. рис. 4). Для современных версий SPICE-моделей BSIMSOI-RAD [9], EKV-RAD [6] для КНИ МОП-транзисторов максимальное количество дополнительно введённых аппроксимирующих коэффициентов a_i , b_i , c_i , учитывающих дозовые радиационные эффекты, может составлять 36 и 24, соответственно.

Заключение. Показано, что измерения характеристик и определение SPICE-параметров биполярных и МОП-транзисторов, подвергнутых воздействию статических видов радиации (электроны, нейтроны, γ -излучение, рентген), существенно усложняется по сравнению с традиционными методами, используемыми для необлучённых транзисторов. В этой связи процедура определения электрических характеристик облучаемых биполярных и МОП-транзисторов формализована и унифицирована. Для всех видов радиации измерения и обработку результатов осуществляют с помощью единого автоматизированного аппаратно-программного комплекса. Это позволяет сократить время измерения на 30—60 % и уменьшить вероятность ошибки оператора, связанной с переключением выводов тестовых приборов и обработкой результатов.

Предложенный измерительный комплекс эффективно используют при исследовании характеристик транзисторов КНИ комплементарной МОП-технологии, интегральных схем в узлах специализированной электроники с повышенной радиационной стойкостью [6, 8], интегральных n — p — n и p — n — p -транзисторов схем операционных усилителей для приёмников и передатчиков систем связи [12], дискретных эпитаксиально-планарных n — p — n -транзисторов, используемых в телеметрических системах [15], мощных биполярных и МОП-транзисторов для вторичных источников питания аппаратуры специального назначения [16], КНИ МОП-транзисторов, применяемых в семействе радиационно-стойких цифроаналоговых базовых матричных кристаллов для микромеханических систем [17].

Статья подготовлена в ходе проведения исследования № 15-01-0165 в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» в 2015 г. и поддержке РФФИ (грант № 14-29-09145).

Литература

1. ГОСТ 20398.7—74. Транзисторы полевые. Методы измерения электрических параметров.
2. ГОСТ 18604.24—81. Транзисторы биполярные высокочастотные. Метод измерения выходной мощности, коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия коллектора.
3. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК Пресс, 2011.
4. Денисенко В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро и наноэлектронике. М.: Физматлит, 2010.
5. Петросянц К. О., Харитонов И. А. Модели МДП и биполярных транзисторов для схемотехнических расчётов БИС с учётом радиационного воздействия // Микроэлектроника, 1994. Т. 23. Вып. 1. С. 21—34.
6. Petrosyants K., Kharitonov I., Sambursky L., Bogatyrev V., Povarnitsyna Z., Drozdenko E. Simulation of total dose influence on analog-digital SOI/SOS CMOS circuits with EKV-RAD macromodel // Proc. of IEEE EWDTs Symp. 2012. P. 60—65.
7. Бобровский Д. В., Давыдов Г. Г., Петров А. Г., Яненко А. В., Ахметов А. О., Боруздина А. Б., Калашников О. А., Кессаринский Л. Н., Некрасов П. В., Никифоров А. Ю. и Уланова А. В. Реализация базовых методов радиационных испытаний ЭКБ на основе аппаратно-программного комплекса аппаратуры National Instruments. Известия вузов. Электроника. 2012. № 5 (97). С. 91—104.
8. Петросянц К. О., Гоманилова Н. Б., Харитонов И. А. Самбурский Л. М., Богатырев В. Н., Поварницына З. М., Щёкин А. А. Проектирование радиационно-стойкого прецизионного усилителя на базе КНС КМОП технологии // Сб. научных трудов «Электроника, микро- и наноэлектроника» / Под ред. В. Я. Стенина. М.: МИФИ, 2013. С. 296—302.
9. Petrosyants K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M. Hardware-Software Subsystem for MOSFETs Characteristic Measurement and Parameter Extraction with Account for Radiation Effects // Advanced Materials Research. 2013. V. 718—720. P. 750—755.
10. Li M., Li Y. F., Wu Y. J., Cai S., Zhu N. Y., Rezzak N., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M., Wang J. Q., Cheng X. X., Wang Y., Wang D. L., Hao Y. Including radiation effects and dependencies on process-related variability in advanced foundry SPICE models using a new physical model and parameter extraction approach // IEEE Trans. Nucl. Sci., 2011. V. 58. P. 2876—2882.
11. Petrosyants, K. O., Kharitonov I. A., Sambursky L. M., Kozhukhov M. V. IV-Characteristics Measurement Error Resulting from Long Cables for Irradiated Bipolar Junction Transistors // Advanced Materials Research. 2015. V. 1083. P. 185—189.
12. Прокопенко Н. Н., Будяков А. С., Савченко Е. М. Операционные усилители с обобщённой токовой обратной связью // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. 2008. Сб. научных трудов / Под ред. А. Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН. 2008. С. 330—333.
13. IC-CAP 2006. User's Guide. Agilent 85190A. [Электрон. ресурс] <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/iccip2008/pdf/icug.pdf> (дата обращения 20.09.2015).
14. XI10 Datasheet. [Электрон. версия] http://www.xfab.com/fileadmin/X-FAB/Download_Center/Technology/SOI/XI10_Info_sheet.pdf (дата обращения 01.09.2015).

15. Petrosyants K. O., Vologdin E. N., Smirnov D. S., Torgovnikov R. A., Kozhukhov M. V. Si BJT and SiGe HBT Performance Modelling after Neutron Radiation Exposure // Proc. of IEEE EWDTS Symp. 2011. P. 267—270.

16. Петросянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л. М., Макеев А. С. Определение параметров SPICE и IBIS моделей ЭКБ для учёта эффектов радиационных воздействий на основании результатов измерения их характеристик // Стойкость 2015: науч.-технич. сб. ФГУП «НИИП», С. 109—110.

17. Петросянц К. О., Харитонов И. А., Самбурский Л. М., Орехов Е. В., Черный А. И., Поварницына З. Н., Богатырев В. Н., Прокофьев Г. В. Исследование характеристик элементной базы аналоговых КНИ КМОП схем, изготовленных по технологии XFAB, с учётом суммарной поглощённой дозы // Электроника, микро- и нанoeлектроника: сб. науч. тр. / Под ред. В. Я. Стенина. М., МИФИ. 2009. С. 57—66.

Дата принятия: 06.11.2015.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

544.012

Анализ методов определения коэффициентов, учитывающих растворённый газ в нефти

М. И. ТОНКОНОГ, К. А. ЛЕВИН, И. И. ФИШМАН

Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии,
Казань, Россия, e-mail: mikhael.tonkonog@yandex.ru

Рассмотрено и проанализировано применение коэффициента, учитывающего растворённый газ в нефти, для определения плотности газонасыщенной нефти. Предложен альтернативный метод расчёта плотности газонасыщенной нефти, основанный на фундаментальных термодинамических положениях и использовании уравнений состояния. Рассмотрена сходимость результатов с экспериментальными данными, оценена точность и применимость данных методов.

Ключевые слова: растворённый газ, газонасыщенная нефть, фазовое равновесие, моделирование процессов.

The analysis is made of application of calculation ratio for the live oil density, taking into account the solution gas. An alternative method for calculation of live oil density is proposed, based on rigorous thermodynamics references and equations of state. The repeatability of the calculation results in both methods is compared with the experimental data. The accuracy and application practices of both calculation methods are estimated.

Key words: solution gas, live oil, phase equilibrium, process simulation.

Повышение точности измерений дебита продуцирующей скважины важно для определения налоговой базы на добычу полезных ископаемых и эффективности мероприятий по интенсификации притока на скважину, ведения баланса и проведения испытаний с целью выявления запасов месторождения. Получение достоверной информации о количестве нефти в составе продукции скважины — сложная задача, в том числе, из-за того, что в результате изменений термодинамических условий при движении продукции от залежи на поверхность происходит массообмен компонентами между газовой и жидкой фазами нефтегазоводяной смеси. Перераспределение компонентов приводит к изменению плотности и, как следствие, массы нефти. В данной статье рассмотрены способы моделирования процесса массообмена между газом и жидкостью и определения влияния количества растворённого газа на плотность жидкой фазы нефтегазоводяной смеси.

Существующие способы определения влияния количества растворенного газа на плотность жидкости. При измерениях массы нефти в составе нефтегазоводяной смеси, а также при моделировании технических процессов добычи и переработки нефти необходимо учитывать влияние растворенного газа на плотность или объём нефти. Правила учёта нефти регламентируют определение массы нетто нефти в составе нефтегазоводяной смеси по формуле [1]:

$$M_n = Q_n \rho;$$

$$Q_n = Q_{ж} (1 - W_Q) K_{с.г} K_{р.г},$$

где M_n — масса нетто нефти; Q_n — объём нетто нефти, приведённый к стандартным условиям; ρ — плотность нетто нефти в стандартных условиях; $Q_{ж}$ — объём нефтегазоводяной смеси в условиях измерительной линии; W_Q — объёмная доля балласта; $K_{с.г}$, $K_{р.г}$ — коэффициенты влияния свободного и растворенного газа, соответственно.

Предположим, что в составе продукции скважины нет балласта и свободного газа ($W_Q = 0$, $K_{с.г} = 1$), имеется только растворенный газ, т. е. система представляет углеводородную среду — газонасыщенную нефть в стабильном однофазном состоянии при давлении p и температуре T , отличных от стандартных ($p_0 = 101325$ Па, $T_0 = 20$ °C):

$$M_n = Q_{ж} K_{р.г} \rho.$$

Тогда плотность газонасыщенной нефти запишем как

$$\rho_{г.н}^L = K_{р.г} \rho, \quad (1)$$

где $\rho_{г.н}^L$ — плотность газонасыщенной нефти.