

# Учет одновременного воздействия низких температур и проникающей радиации на характеристики биполярных и JFET транзисторов при схемотехническом моделировании

О.В. Дворников<sup>1</sup>, В.А. Чеховский<sup>2</sup>, Н.Н. Прокопенко<sup>3</sup>, Я.Д. Галкин<sup>4</sup>, А.В. Кунц<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ОАО “Минский научно-исследовательский приборостроительный институт”, г. Минск

<sup>2</sup>“Институт ядерных проблем” Белорусского государственного университета, г. Минск

<sup>3</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, prokopenko@sssu.ru

<sup>4</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

**Аннотация** — Представлен аналитический обзор разработанного комплекса средств, предназначенных для учета в "Spice-подобных" программах влияния гамма-излучения, потока нейтронов и низких температур на вольтамперные характеристики (ВАХ) биполярных транзисторов (BJT) и полевых транзисторов с р-п-переходом (JFET). Описаны особенности библиотек параметров BJT и JFET, изготовленных по двум технологическим маршрутам ОАО "Интеграл" (г. Минск), приведено сравнение результатов измерений и моделирования основных ВАХ.

**Ключевые слова** — "Spice-модели", схемотехническое моделирование, радиационная стойкость, криогенная электроника.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В космических аппаратах для обработки сигналов датчиков часто применяют аналоговые интерфейсы, расположенные около датчиков, вне подогреваемых и защищенных от воздействия проникающей радиации (ПР) блоков аппаратуры. Эти интерфейсы обычно представляют собой аналоговые интегральные схемы (ИС) малой степени интеграции, которые должны сохранять работоспособность при одновременном воздействии низких температур и ПР.

Создание таких радиационно-стойких низкотемпературных аналоговых ИС значительно затруднено тем, что типовые САПР и модели интегральных элементов, не обеспечивают адекватные результаты схемотехнического моделирования в необходимых жестких условиях эксплуатации.

Целью настоящей статьи является аналитический обзор созданного комплекса средств, позволяющего выполнять схемотехническое моделирование биполярно-полевых аналоговых ИС при одновременном воздействии низких температур и ПР, а также результатов его апробации для двух технологических маршрутов ОАО "ИНТЕГРАЛ" (г. Минск).

## II. КОМПЛЕКС СРЕДСТВ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для одновременного учета воздействия низких температур и ПР на параметры BJT и JFET были выполнены следующие работы:

- осуществлен выбор САПР и "Spice-моделей";
- проведено изучение радиационных и температурных изменений ВАХ транзисторов, при котором особое внимание уделено характеристикам, влияющим на параметры аналоговых ИС;
- доработаны комбинированные модели транзисторов;
- из экспериментальных данных получены радиационные и низкотемпературные аппроксимации "Spice- параметров";
- разработана методика одновременного учета воздействия низких температур и ПР при схемотехническом моделировании в LTspice;
- предложено прогнозирование стойкости ИС к радиационным дефектам на основе экспериментальных данных, полученных при облучении "быстрыми" электронами.

### A. Выбор САПР и "Spice-моделей" [1, 2]

При схемотехническом моделировании ИС применяют разнообразные коммерческие САПР со встроенными моделями BJT (обычно модель Гуммеля-Пуна), моделью Шихмана-Ходжеса для JFET и параметрами моделей ("Spice-параметрами"), содержащимися в фирменных библиотеках предприятий.

Моделирование при низких температурах типовых ВАХ BJT позволило установить, что в OrCAD, HSPICE наблюдаются выбросы и искажения при температурах менее  $-148^{\circ}\text{C}$ , а в LTspice такое моделирование может быть проведено при условии модификации "Spice-моделей".

Кроме того, анализ известных методов модификации "Spice-моделей" для описания влияния ПР выявил, что для одновременного учета влияния

радиации и низких температур в ВJT и JFET допустимо применение типовых моделей Гуммеля-Пуна, Шихмана-Ходжеса и математических выражений, устанавливающих взаимосвязь параметров моделей, полупроводника и радиационного облучения, а также усредненных температурных коэффициентов или эмпирических аппроксимаций параметров моделей, например, для описания немонотонного изменения максимального тока стока и крутизны JFET в диапазоне температур от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ .

#### *В. Изучение радиационных и температурных изменений ВАХ [3 -5]*

Облучение образцов гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  выполнялось на установке «Исследователь» с мощностью дозы гамма-излучения  $12,4$  рад/с, а «быстрыми» электронами с энергией от  $4$  до  $6$  МэВ - на линейном ускорителе «Электроника ЭЛУ-4» [6]. Облучение осуществлялось при температуре около  $25^{\circ}\text{C}$ , а сами образцы были с закороченными выводами.

Низкотемпературные измерения проводились на экспериментальной установке с использованием методик, описанных в [7-9].

Измерения проводились для 5 образцов транзисторов каждого типа. Обработка результатов измерений для каждого типа транзисторов при каждом виде воздействия (ПР, температура) осуществлялась следующим образом:

- для всех JFET были построены зависимости тока стока  $I_D$  от напряжения затвор-исток  $V_{GS}$  при напряжении сток-исток заведомо большим напряжения отсечки  $|V_{DS}|=5$  В;

- для всех ВJT были построены зависимости статического коэффициента усиления тока базы в схеме с общим эмиттером  $\beta=I_C/I_B$ , где  $I_C$ ,  $I_B$  - коллекторный и базовый ток, соответственно, от эмиттерного тока  $I_E$  при напряжении коллектор-база  $|V_{CB}|=3$  В;

- визуально определялся "типичный" образец, ВАХ которого наиболее близка к средней;

- для "типичного" образца JFET по разработанным ранее методикам [9] выполнялась идентификация параметров модели VTO, BETA, LAMBDA в области насыщения ВАХ, были построены зависимости  $\sqrt{I_D}$  от  $V_{GS}$ , нормированная выходная характеристика в схеме с общим истоком  $I_D/I_{D10V}$  от  $V_{DS}$ , где  $I_{D10V}=I_D$  при  $V_{GS}=\text{const}$ ,  $|V_{DS}|=10$  В, установлена область адекватности моделей, при необходимости идентифицированы 2 набора параметров для разных диапазонов токов стока, рассчитан параметр  $\text{VAF}=1/\text{LAMBDA}$ ;

- для ВJT по методикам, описанным в [8] идентифицировался параметр модели VAF (напряжение Эрли), измерялась зависимость напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе  $V_{BE}$  от  $I_E$ , для "типичного" ВJT была построена нормированная выходная характеристика в схеме с

общим эмиттером  $I_C/I_{C1V}$  от  $V_{CE}$ , где  $I_{C1V}=I_C$  при  $I_B=\text{const}$ ,  $|V_{CE}|=1$  В.

#### *С. Особенности комбинированных моделей [11]*

Для описания воздействия ПР и низких температур "Spice-модели" были дополнены соотношениями, связывающими параметры моделей с конструктивно-технологическими и электрофизическими параметрами. Такие комбинированные модели позволяют выявить факторы, преимущественно влияющие на основные характеристики ВJT и JFET, и упростить схемотехническое моделирование аналоговых микросхем в жестких условиях эксплуатации.

Так, на статические характеристики ВJT и JFET наиболее существенно влияют следующие изменяющиеся при радиационном облучении параметры модели [1, 11]: BF, VAF, IKF, IS, ISE, RC, RE, RB, BETA, VTO, LAMBDA, RD, RS, - подробное рассмотрение которых и методы идентификации приведены в [8, 9, 12]. Взаимосвязь этих "Spice-параметров" с параметрами полупроводника и ПР описывается приближительными математическими выражениями [1]:

$$\text{BF} \sim \frac{N_{DE}}{N_{AB}}, \quad (1)$$

$$\text{VAF} \sim N_{AB} \sqrt{\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}}, \quad (2)$$

$$\text{IKF} \sim N_{AB}, \quad (3)$$

$$\text{IS} \sim \frac{1}{N_{AB}}, \quad (4)$$

$$\text{ISE} \sim \left( \frac{d_E}{2\tau} S_E + v_S S_{\text{SURF}} \frac{n_I}{N_{AB}} \right), \quad (5)$$

$$\text{RC} \sim N_{DC}^{-1}, \text{RE} \sim N_{DE}^{-1}, \text{RB} \sim N_{AB}^{-1}, \quad (6)$$

$$\text{BETA} \sim \mu_{CH}, \quad (7)$$

$$\text{VTO} \sim N_{CH}, \quad (8)$$

$$\text{LAMBDA} \sim N_{CH}^{-0.5}, \text{RD} \sim N_D^{-1}, \text{RS} \sim N_S^{-1}, \quad (9)$$

$$\frac{n_F}{n_0} = \exp(-K_N F), \quad (10)$$

$$K_N = \frac{1}{c n_0^\gamma}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{\mu_F} = \frac{1}{\mu_0} + K_\mu F, \quad (12)$$

где  $N_{DE}, N_{DC}, N_{AB}, N_{CH}, N_D, N_S$  – концентрация доноров в эмиттере и коллекторе, акцепторов в базе n-p-n ВJT, примеси в канале, стоке, истоке JFET;  $d_E$  – ширина области пространственного заряда (ОПЗ) эмиттерного p-n- перехода;  $\tau$  – эффективное время жизни носителей заряда в ОПЗ;  $S_E$  – площадь эмиттерного перехода;  $v_S$  – скорость поверхностной рекомбинации;  $S_{SURF}$  – величина площади полупроводника, на которой происходит поверхностная рекомбинация;  $n_i$  – собственная концентрация носителей;  $\mu_{NB}, \mu_{CH}$  – подвижность электронов в базе n-p-n ВJT, основных носителей заряда в канале JFET;  $K_N, K_\mu$  – коэффициенты радиационного изменения концентрации и подвижности основных носителей заряда;  $F$  – флюенс частиц (подстрочный символ «E» относится к электронам, «p» - протонам, «G» - гамма- квантам, «N» - нейтроны);  $\sigma, \gamma$  - эмпирические коэффициенты, зависящие от вида частиц и их энергии, типа проводимости полупроводника.

Соотношения (1)-(6) справедливы для n-p-n ВJT, однако их допустимо применять и для p-n-p при соответствующей замене переменных.

Совместное применение соотношений (1)-(12) позволяет описать радиационное изменение "Spice-параметров". Ниже приведен фрагмент описания модели n-p-n ВJT в соответствии с правилами LTspice:

```
*Оценка относительного изменения концентрации
* в областях эмиттера (em), базы (pb), коллектора (ep)
.param Nnem={exp(-Fn/(444*pow(Nem, 0.77)))}
.param Nnepi={exp(-Fn/(444*pow(Nepi, 0.77)))}
.param Nnpb={exp(-Fn/(387*pow(Npb, 0.77)))}
*Оценка относительного изменения подвижности
.param Mnepi={1/(1+Fn*Мepi*1.65e-18)}
*фрагмент модели npn
.model npn npn
+IS={5.4e-17/Nnpb}
+BF={300*Nnem/Nnpb}
+VAF={31*Nnpb/sqrt(Nnepi)}
+IKF={4.3m*Nnpb}
+BR={0.7*Nnepi/Nnpb}
+RB={200/Nnpb}
+RBM={6.67/Nnpb}
```

Величина скорости поверхностной рекомбинации для n-p-n ВJT определяется экспериментальными данными, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

*Эмпирическая зависимость скорости поверхностной рекомбинации от поглощенной дозы облучения  $D_G$*

$D_G$ , гр	$10^3$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^3$	$10^4$	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
fit, см/с	31,333	50,31	125,288	129,122	410,913	1095,19	1627,15

Преимуществом предложенных комбинированных моделей является то, что они могут быть применены к различным технологическим маршрутам изготовления ИС, содержащих ВJT и JFET, без дополнительных радиационных исследований за счет изменения

исходных данных, характеризующих типовую структуру.

#### D. Использование радиационных и низкотемпературных аппроксимаций "Spice-параметров" [1, 5]

Типовая модель Шихмана-Ходжеса JFET не описывает немонотонное изменение его характеристик при низких температурах, а именно увеличение максимального тока стока  $I_{DMAX}$  ( $I_{DMAX}=I_D$  при  $V_{GS}=0, V_{DS}=V_{TN}$ ) и крутизны при уменьшении температуры ориентировочно до  $-100^\circ\text{C} \dots -130^\circ\text{C}$ , а затем уменьшение тока стока и крутизны при дальнейшем спаде температуры.

Одним из способов учета этого эффекта во встроенной в LTspice модели Шихмана-Ходжеса является исключение зависимости параметра  $BETA=f(T)$  за счет введения коэффициента  $betaTCE=-1e-9$ , и введение аппроксимации, основанной на экспериментальных данных. Так, для транзисторов базового матричного кристалла (БМК) АБМК-1.3 аппроксимация  $BETA=f(T)$  получена в виде (здесь и далее  $T$  – температура в градусах Цельсия)

$$BETA = -3,1571E-12T^4 + 3,4164E-10T^3 + 1,1255E-07T^2 - 1,3408E-05T + 2,9107E-03. \quad (13)$$

Совпадение измеренных величин  $BETA$  и выражения (13) показано на рис. 1.

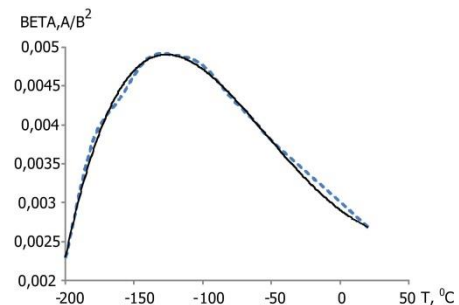


Рис. 1. Зависимость измеренного параметра  $BETA$  (пунктирная линия) и рассчитанного по выражению (13) (сплошная линия) от температуры для транзисторов АБМК-1.3

В то же время температурная зависимость параметра  $VTO$  остается без изменений и описывается встроенными в LTspice математическими выражениями.

Таким образом, фрагмент модели p-JFET, учитывающий температурное и радиационное изменение статических ВАХ, имеет вид:

```
.param bL=
{-3.2p*pow(LT,4)+.34n*pow(LT,3)+.11u*pow(LT,2)-
13.4u*LT+2.9m}
+Vto={-2*Nsumpch}
+beta={bL*Msumpch}
+lambda={0.015*pow(Nsumpch,-0.5)}
+Rd={10/Nsumpb}
+Rs={10/Nsumpb}
```

При моделировании температурных зависимостей ВАХ JFET необходимо задавать температуру с использованием параметрического анализа и глобального параметра LT

```
.step param LT list -197 -120 -60 30
.dc Vgs 0 3 10m temp list {LT}.
```

Такое описание радиационных и температурных изменений ВАХ возможно в том случае, когда известны параметры типовой структуры (концентрации и глубины залегания полупроводниковых слоев, топологические размеры областей и пр.) и зависимости этих параметров от воздействия ПР в соответствии с (1)-(12).

Чаще всего, такая информация отсутствует, поэтому целесообразно создавать аппроксимации радиационных и температурных зависимостей основных "Spice-параметров" и встраивать их в модель. К сожалению, при этом любое значительное изменение технологического маршрута требует проведения повторных испытаний и корректировки аппроксимаций.

Последний подход был применен при создании моделей комплементарных JFET. Для чего:

- зарегистрированы радиационные и температурные изменения максимального тока стока  $I_{DMAX}$ ,  $V_{AF}$  и напряжения отсечки  $V_{TH}$ ;
- получены радиационные и температурные аппроксимации зависимостей;
- аппроксимации встроены в модель Шихмана-Ходжеса;
- проведено моделирование ВАХ и сравнение их с результатами измерений.

Было установлено, что в диапазоне флюенсов «быстрых» электронов от  $3 \cdot 10^{13}$  до  $1 \cdot 10^{16}$  эл./см<sup>2</sup> изменение  $V_{TH}$  и  $I_{DMAX}$  можно аппроксимировать следующими зависимостями

для p-JFET

$$V_{TH} = -2,6149 \cdot 10^{-33} F_E^2 - 8,7924 \cdot 10^{-18} F_E + 1,7886, \quad (14)$$

$$I_{DMAX} = -3,695 \cdot 10^{-37} F_E^2 - 1,084 \cdot 10^{-21} F_E + 1,575 \cdot 10^{-4}, \quad (15)$$

для n-JFET

$$V_{TH} = 5,7124 \cdot 10^{-33} F_E^2 + 3,1466 \cdot 10^{-18} F_E + 1,2941, \quad (16)$$

$$I_{DMAX} = 1,637 \cdot 10^{-36} F_E^2 - 3,593 \cdot 10^{-21} F_E + 6,152 \cdot 10^{-4}. \quad (17)$$

Изменение напряжения отсечки с уменьшением температуры допустимо аппроксимировать следующими выражениями

для p-JFET

$$V_{TH} = -6,63 \cdot 10^{-6} T^2 + 1,42 \cdot 10^{-3} T + 1,745, \quad (18)$$

для n-JFET

$$V_{TH} = 5,1 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,145 \cdot 10^{-3} T + 1,147. \quad (19)$$

Немонотонное температурное изменение параметра  $\beta$ , идентифицированного из передаточных ВАХ, описывается соотношениями

для p-JFET

$$\beta = -3,858 \cdot 10^{-15} T^5 - 1,577 \cdot 10^{-12} T^4 - 1,636 \cdot 10^{-10} T^3 - 2,268 \cdot 10^{-9} T^2 - 1,952 \cdot 10^{-7} T + 6,351 \cdot 10^{-5}, \quad (20)$$

для n-JFET

$$\beta = -4,595 \cdot 10^{-14} T^5 - 2,191 \cdot 10^{-11} T^4 - 2,83 \cdot 10^{-9} T^3 - 6,767 \cdot 10^{-8} T^2 - 1,868 \cdot 10^{-6} T + 6,287 \cdot 10^{-4}. \quad (21)$$

Изменением напряжения Эрли (параметра  $\lambda$ ), идентифицированного из выходных ВАХ, в диапазоне температур от  $-150^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$  можно пренебречь.

#### Е. Методика одновременного учета воздействия низких температур и проникающей радиации

Для проведения схемотехнического моделирования низкотемпературных аналоговых ИС рекомендуется использовать САПР LTspice XVIII с директивами температурного и параметрического анализа (.param, .step) и рассмотренные ранее модели транзисторов.

На рис. 2-4 приведены результаты моделирования ВТ и JFET в типовых схемах включения с применяемыми директивами управления.

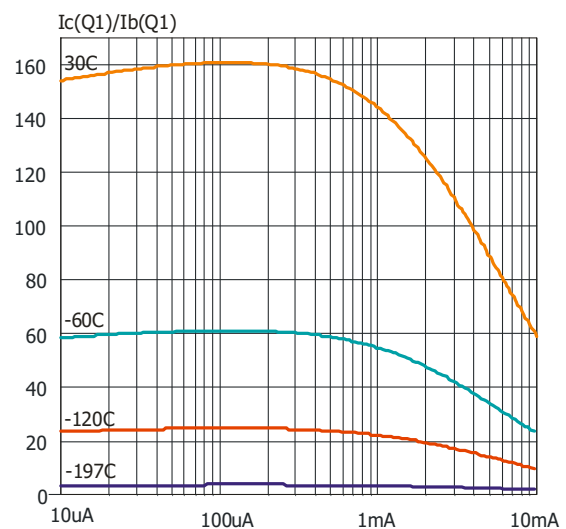


Рис. 2. Результаты моделирования для p-n-p-транзистора АБМК-1.3 зависимости  $\beta$  от  $I_E$  при разных температурах, без воздействия ПР. Директивы управления:

```
.step param LT list -197 -120 -60 30
.dc dec II 10u 10m 101 temp list {LT}
.param LT=30
.param Fn=1
.param Dg=1
.param fit=1
```

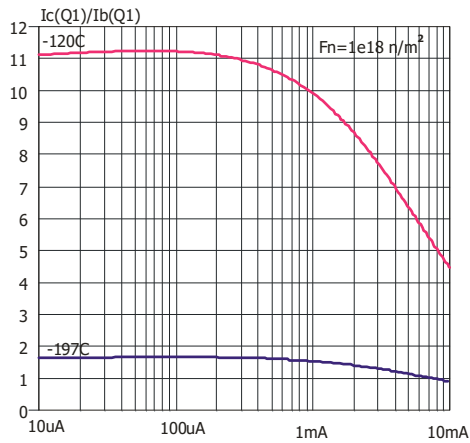


Рис. 3. Результаты моделирования для p-n-p-транзистора АБМК-1.3 зависимости  $\beta$  от  $I_E$  при разных температурах и воздействии флюенса нейтронов  $F_N=10^{14}$  н/см<sup>2</sup>.

Директивы управления:

```
.step param LT list -197 -120
.dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}
.param LT=30
.param Fn=1e18
.param Dg=1
.param fit=1
```

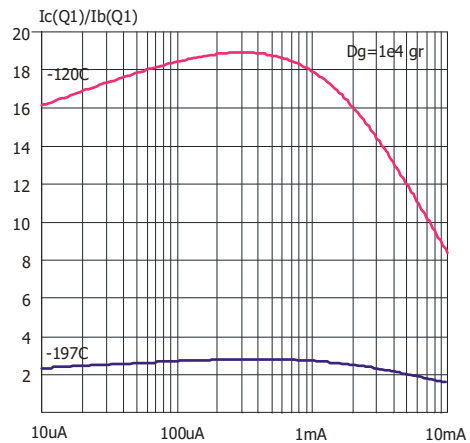


Рис. 4. Результаты моделирования для p-n-p-транзистора АБМК-1.3 зависимости  $\beta$  от  $I_E$  при разных температурах и поглощенной дозе гамма- облучения  $D_G=1$ Мрад.

Директивы управления:

```
.step param LT list -197 -120
.dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}
.param LT=30
.param Fn=1
.param Dg=1e4
.param fit=410.913
```

В подрисуночных подписях:

- LT - глобальный параметр, описывающий температуру в градусах Цельсия,
- поток нейтронов с размерностью н/м<sup>2</sup> устанавливался по директиве .param Fn=значение [н/м<sup>2</sup>],
- влияние поглощенной дозы с размерностью грэй (1 грэй=100 рад) устанавливалось через параметр fit модели по директивам .param Dg= значение [грэй], .param fit= значение (из табл. 1).

При температурном анализе JFET в LTspice необходимо одновременно одинаково изменять температуру и глобальный параметр LT. Пример такого изменения при моделировании выходных ВАХ приведен ниже

```
.param LT=30
.step param LT list -197 -120 30
.dc Vds 0 10 10m temp list {LT}
```

*F. Прогнозирование стойкости ИС к радиационным дефектам на основе экспериментальных данных, полученных при облучении "быстрыми" электронами [13]*

С нашей точки зрения, по результатам, полученным для «быстрых» электронов, допустимо прогнозировать радиационную стойкость микросхем к нейтронам и протонам, а именно: определить величину и энергию потока нейтронов и протонов, вызывающую изменение параметров ИС, идентичное экспериментальным данным для электронного облучения.

Данное утверждение базируется на соотношениях:

$$N_{DE} = F_E v_E \sigma_{DE} n_{AP}, \quad (22)$$

$$N_{DP} = F_P v_P \sigma_{DP} n_{AP}, \quad (23)$$

$$N_{DN} = F_N v_N \sigma_{DN} n_{AP}, \quad (24)$$

где  $N_{DE}$ ,  $N_{DP}$ ,  $N_{DN}$  – концентрация дефектов смещения, вызванных электронами, протонами и нейтронами, соответственно;  $v_E$ ,  $v_P$ ,  $v_N$  – среднее число смещенных атомов, создаваемых одним первично смещенным атомом, при облучении электронами, протонами и нейтронами;  $\sigma_{DE}$ ,  $\sigma_{DP}$ ,  $\sigma_{DN}$  – сечение смещения атома-мишени при облучении электронами, протонами и нейтронами, соответственно;  $n_A$  – число атомов облучаемого вещества, приходящееся на 1 кг массы;  $\rho$  – удельная плотность.

Экспериментальные значения коэффициентов  $\nu$  и  $\sigma$  в зависимости от энергии частиц приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

*Среднее число смещенных атомов в зависимости от энергии частиц*

Е, МэВ	$\nu_N$	$\nu_P$	$\nu_E$
0,1	—	3,3	—
0,5	—	4,1	0,8
0,7	—	—	1,0
1,0	—	4,5	1,1
1,5	140	—	1,4
2,0	—	5,0	—
4,0	—	5,2	2,0
7,0	—	5,4	2,5
12,0	150	6,1	3,1
50,0	—	6,4	—

Таблица 3

Сечения смещения для кремния в зависимости от энергии частиц

E, МэВ	$\sigma_{DN}, \text{м}^2$	$\sigma_{DP}, \text{м}^2$	$\sigma_{DE}, \text{м}^2$
> 0,1	—	—	$5,5 \cdot 10^{-27}$
от 1 до 2	$(1-120,3/E_N[\text{эВ}]) \cdot 2,6 \cdot 10^{-28}$	—	—
от 2 до 40	—	$\log \sigma_{DP} = -22,4 - \log(E_P[\text{МэВ}])$	—

На основании соотношений (22)-(24) и табл. 2, 3 можно предположить, что флюенс электронов  $F_E$  с энергией  $E_E = 4$  МэВ вызовет в ИС такие же дефекты смещения как поток нейтронов  $F_N = 0,302F_E$  с энергией  $E_N = 1,5$  МэВ или поток протонов  $F_P = 1,1 \cdot 10^{-4} F_E$  с энергией  $E_P = 2,0$  МэВ. Другими словами, одинаковая концентрация радиационных дефектов достигается при существенно меньшем флюенсе протонов, по сравнению с электронами.

### III. ОПИСАНИЕ СОЗДАННЫХ БИБЛИОТЕК ПАРАМЕТРОВ [14, 15]

Полученные результаты были использованы при создании двух библиотек параметров:

- MN2XA030\_25.03.20.lib - параметры моделей для элементов БМК MN2XA030, изготовленного по биполярно-полевой технологии ОАО "ИНТЕГРАЛ";
- CJFET\_25.03.20.lib - параметры моделей для комплементарных JFET ОАО "ИНТЕГРАЛ".

#### A. Библиотека параметров MN2XA030\_25.03.20.lib

В рассматриваемой библиотеке учет воздействия ПР осуществлен путем применения комбинированных моделей, температурные зависимости ВТ описаны температурными коэффициентами, усредненными в диапазоне температур от  $-200^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ , а температурное изменение ВАХ JFET - низкотемпературной аппроксимаций "Spice-параметра" BETA и усредненным температурным коэффициентом для VTO.

Библиотека содержит:

- модели с названием **npn**, **pnп**, **JFET** малосигнальных транзисторов;
- модель диода с названием **DST**, которая описывает пробой эмиттерного перехода п-р-п-транзистора. Рекомендуется при использовании диода в качестве стабилизатора;
- модель с названием **DgSub** паразитного диода, подключаемого к затвору р-JFET. Рекомендуется подключение диода с этой моделью при выполнении АС и TRAN-анализа;
- модель с названием **DCmos** паразитного диода полупроводниковой обкладки МОП-конденсатора  $1,07$  пФ. Рекомендуется подключение диода с этой моделью и масштабирующим коэффициентом AREA, равным отношению емкости применяемого конденсатора к значению  $1,07$  пФ, при выполнении АС и TRAN-анализа;

- модель с названием **Rp** для резисторов с сопротивлением  $1,05$  кОм;  $2,45$  кОм;  $3,5$  кОм;  $0,735$  кОм и **Rpr** для резисторов с сопротивлением  $5,2$  кОм;  $10,8$  кОм;  $16$  кОм;  $3,51$  кОм.

"Spice-параметры" библиотеки позволяют описать:

1. Изменение ВАХ при воздействии гамма-излучения путем одновременного задания величины поглощенной дозы (параметр Dg с размерностью грэй) и значения коэффициента fit. Доступные сочетания Dg и fit содержатся в файле MN2XA030\_25.03.20.lib.

2. Изменение ВАХ при воздействии нейтронов заданием величины флюенса (параметр Fn с размерностью  $\text{м}^{-2}$ ). Рекомендуется, чтобы значение флюенса не превышало  $10^{14} \text{см}^{-2}$ , т.к. только при этих значениях флюенса модель проверена экспериментально по данным, полученным для "быстрых" электронов и методике раздела F. Моделирование воздействия нейтронов можно выполнить при параметрическом анализе. Например, для нормальных условий и типичных флюенсов  $5 \cdot 10^{13} \text{см}^{-2}$ ,  $3 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2}$  директива управления будет:

.STEP param Fn LIST 1 5e17 3e18.

3. Температурные зависимости ВАХ при установке одинаковых значений температуры и глобального параметра LT. Параметры модели экспериментально апробированы в диапазоне температур от минус  $200^\circ\text{C}$  до  $30^\circ\text{C}$ .

4. Технологический разброс падения напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе п-р-п и р-п-р-транзисторов изменением параметра NPNscale, PNPscale; разброс  $\beta$  - параметром BFscale; разброс ВАХ р-JFET - параметром VTOValue; разброс сопротивлений резисторов - параметрами Rpscale, Rprscale.

Рис. 5-7 иллюстрируют возможности моделирования ВАХ с использованием рассматриваемой библиотеки.

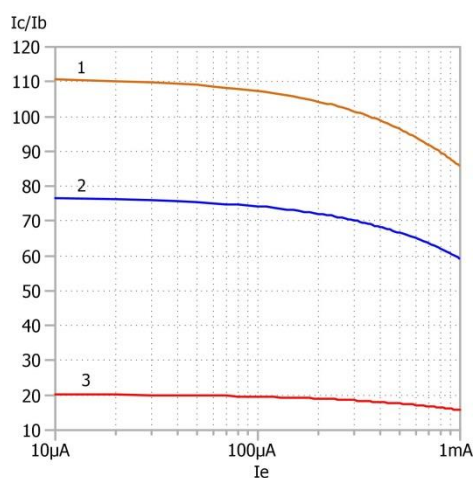


Рис. 5. Результаты моделирования зависимости  $\beta$  п-р-п-транзистора от эмиттерного тока при разных потоках нейтронов: 1 -  $1 \text{ н./см}^2$ , 2 -  $10^{13} \text{ н./см}^2$ , 3 -  $10^{14} \text{ н./см}^2$

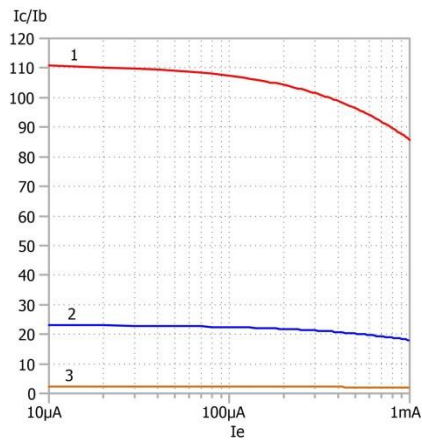


Рис. 6. Результаты моделирования зависимости  $\beta$  p-n-p транзистора от эмиттерного тока при разных температурах: 1 - 30°C, 2 - минус 100°C, 3 - минус 197°C

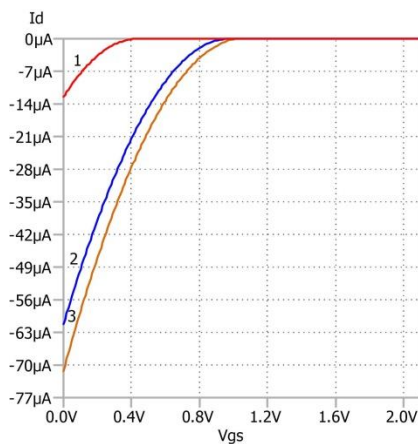


Рис. 7. Результаты моделирования зависимости  $I_D$  от  $V_{GS}$  p-JFET при минус 197°C и разных потоках нейтронов: 1 -  $10^{15}$  н./см<sup>2</sup> ( $V_{TH}=0,43$  В), 2 -  $10^{14}$  н./см<sup>2</sup> ( $V_{TH}=0,97$  В), 3 -  $10^{13}$  н./см<sup>2</sup> ( $V_{TH}=1,04$  В)

#### В. Библиотека CJFET\_25.03.20.lib

В рассматриваемой библиотеке учет воздействия ПР и низких температур осуществлен путем применения радиационных и низкотемпературных аппроксимаций "Spice-параметров", полученных из экспериментальных данных. Влияние флюенса нейтронов описано на основании экспериментальных данных для "быстрых" электронов с применением методики, рассмотренной в разделе F.

Библиотека содержит:

- модели JFET ОАО «ИНТЕГРАЛ» с названием **JN260\_6**, **JN260\_4**, **JN260\_2**, **JP50\_6**, **JP50\_4**, **JP50\_2**. В названии модели указан тип проводимости канала и топологические размеры ширины W и длины L затвора. Например, **JN260\_6**-n-JFET с W=260 мкм, L=6 мкм;
- модели JFET с названием **JN260\_6u**, **JP50\_6u**, подстроенные для применения при токах стока от 50 нА до 1 мкА;
- модели с названием **DJP50\_6**, **DJP50\_4**, **DJP50\_2**, **DJN260\_6**, **DJN260\_4**, **DJN260\_2** паразитных диодов, подключаемых к затворам соответствующих JFET;

- модель с названием **DCmos05** паразитного диода полупроводниковой обкладки МОП-конденсатора 0,5 пФ;

- модель с названием **Rp** для резисторов с сопротивлением до 5 кОм и **Rpr** для резисторов с сопротивлением более 5 кОм.

"Spice- параметры" библиотеки позволяют описать:

1. Изменение ВАХ при воздействии нейтронов заданием величины флюенса (параметр  $F_n$  с размерностью см<sup>-2</sup>). Рекомендуется значение флюенса выбирать в диапазоне от  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> до  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>. При  $F_n < 10^{13}$  см<sup>-2</sup> экспериментальное изменение ВАХ крайне незначительно и его можно не учитывать, при  $F_n > 10^{15}$  см<sup>-2</sup> экспериментальные данные, применяемые для получения аппроксимаций, необходимо перепроверить.

2. Влияние гамма-излучения с поглощенной дозой до 1 Мрад можно не учитывать при схемотехническом проектировании из-за крайне незначительного экспериментального изменения ВАХ JFET.

3. Температурные зависимости ВАХ при установке одинаковых значений температуры и глобального параметра LT. Параметры модели экспериментально апробированы в диапазоне температур от минус 200°C до 30°C.

4. Технологический разброс сопротивлений резисторов описывается параметрами Rpscale, Rprscale.

5. ВАХ транзисторов в режиме малых токов стока при одновременном воздействии ПР и низких температур.

Анализ зависимости  $\sqrt{I_D}$  от  $V_{GS}$  и  $I_D/I_{D10V}$  от  $V_{DS}$  позволил установить, что для тока стока менее 1 мкА требуется отдельный набор параметров моделей.

Возможность учета низких температур, а также совпадение результатов моделирования и измерений ВАХ при различных температурах и токах стока иллюстрируют рис. 8-9.

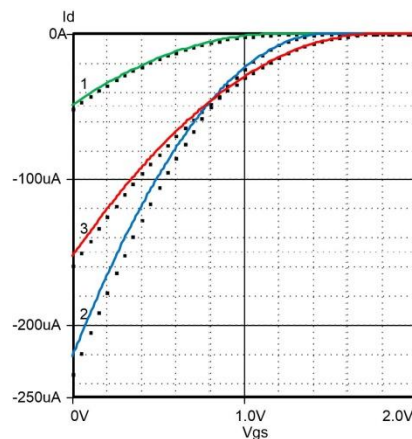
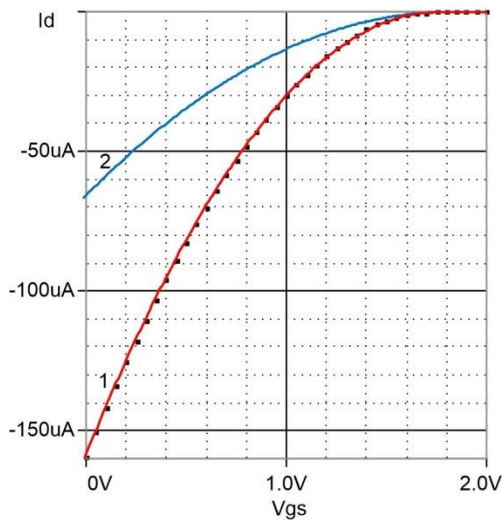


Рис. 8. Результаты измерений и моделирования зависимости  $I_D$  от  $V_{GS}$  для JP50\_6 при разных температурах: 1 - минус 197°C; 2 - минус 120°C; 3 - 30°C



**Рис. 9. Результаты измерений и моделирования зависимости  $I_D$  от  $V_{GS}$  для p-JFET при  $T=30^\circ\text{C}$ : 1 – JP50\_6; 2- JP50\_6u**

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В аналитическом обзоре рассмотрены результаты комплексных работ по созданию для САПР LTSpice средств моделирования влияния ПР и низких температур на ВАХ ВJT и JFET, а именно: методики проведения исследований радиационных и температурных изменений ВАХ, методики одновременного учета воздействия низких температур и ПР при моделировании, методика прогнозирования стойкости ИС к радиационным дефектам, доработанные комбинированные модели транзисторов, радиационные и низкотемпературные аппроксимации «Spice- параметров».

Приведены результаты апробации предложенных средств моделирования при создании библиотек параметров - MN2XA030\_25.03.20.lib и CJFET\_25.03.20.lib.

В библиотеке MN2XA030\_25.03.20.lib учет воздействия ПР осуществлен путем применения комбинированных моделей, температурные зависимости ВJT описаны усредненными температурными коэффициентами, а температурное изменение ВАХ JFET – с помощью низкотемпературной аппроксимации "Spice- параметра" BETA и усредненного температурного коэффициента для VTO.

В библиотеке CJFET\_25.03.20.lib учет воздействия ПР и низких температур осуществлен путем применения радиационных и низкотемпературных аппроксимаций "Spice-параметров", причем влияние флюенса нейтронов описано на основании экспериментальных данных для "быстрых" электронов.

Результаты моделирования ВАХ CJFET сравнены с измерениями и выделены диапазоны тока стока, в которых созданные модели адекватны.

#### ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 16-19-00122-П).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998507.
- [2] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N. and Bugakova A.V. Basic Parameters and Characteristics of the Op-Amp Based on the BiJfet Array Chip MH2XA030 Intended for the Design of Radiation-Hardened and Cryogenic Analog ICs // 2018 14TH International Scientific technical Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, October 2-6, 2018. P. 200-207. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545562.
- [3] Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б. Изменение параметров комбинированных биполярных транзисторов при воздействии ионизирующих излучений // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2015. Вып. 3. С. 17-22.
- [4] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45. No. 1. P. 54-62. DOI: 10.1134/S10 63739716010030.
- [5] Dvornikov O., Dziatlau V., Tchekhovski V., Prokopenko N., Zhuk A., Bugakova A. Modernization of Low-Temperature JFET Models Built into LTSpice CAD Systems, Taking into Account the Results of their Experimental Study // Latin American Electron Devices Conference (LAEDC-2020). San José, Costa Rica, February 25 - 28, 2020.
- [6] Radiatsionnytsentr GNPO «Nauchno-PrakticheskiiTsentr NAN Belarusi po Materialovedeniyu» [Radiation Centre SSPA "Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus"] // Spravochnik tsentrov kollektivnogo pol'zovaniya unikal'nyim nauchnym oborudovaniem i priborami. 4-ivypusk. Minsk, SO «BELISA», 2008. P. 40-41.
- [7] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Software and hardware complex for studying semiconductor devices at low, incl. cryogenic, temperatures // 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon). DOI:10.1109/URALCON.2017.8120719.
- [8] Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 2. Идентификация параметров модели, описывающих вольтамперные характеристики биполярных транзисторов // Современная электроника. 2009. № 6. С. 52-61.
- [9] Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 4. Идентификация параметров модели Шихмана-Ходжеса полевого транзисторов с p-n- переходом // Современная электроника. 2009. № 8. С. 50-57.
- [10] URL: <http://mnpi.by/articles/kontrol-elektricheskikh-parametrov-elektronnyh-komponentov.html>



- [11] Дворников О.В., Гришков В.Н. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в “Spice-подобных” программах // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИПИМ РАН, 2010. С. 301-306.
- [12] Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1. Расчет «Spice-параметров» биполярных транзисторов с использованием конструктивно-технологических и электрофизических параметров // Современная электроника. 2009. № 5. С. 48-53.
- [13] Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б. Прогнозирование стойкости биполярных микросхем к различным видам проникающих излучений // Материалы 23-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 8-13 сент. 2013 г.). Т. 2. С. 925-927.
- [14] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N. and Bugakova A.V. BiFet Array Chip MH2XA030 — a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 22-23.10.2018, Saint Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.
- [15] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. Influence of Penetrating Radiation on Current-Voltage Characteristics of Complementary JFETs // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). October 17-18, 2019, Saint Petersburg, Russia. P. 1-4. DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906794.

## Taking into Account the Simultaneous Effect of Low Temperatures and Penetrating Radiation on the Characteristics of the Bipolar and JFETs in Circuit Simulation

O.V. Dvornikov<sup>1</sup>, V.A. Tchekhovski<sup>2</sup>, N.N. Prokopenko<sup>3</sup>, Ya.D. Galkin<sup>4</sup>, A.V. Kunts<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ОАО “Minsk Scientific and Research Instrument-Making Institute”, Minsk

<sup>2</sup>“Research Institute for Nuclear Problems” of Belarusian State University, Minsk

<sup>3</sup>“Don State Technical University”, Rostov-on-Don, prokopenko@sssu.ru

<sup>4</sup>“Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, Minsk

**Abstract** — The authors of the article consider the results of the papers on creation of the tools for simulating the effect of penetrating radiation and low temperatures, up to -200°C, on the current-voltage characteristics (CVC) of the BJTs and JFETs for LTspice CAD systems: the methods for conducting the studies of radiation and temperature changes in the CVCs, the methods for simultaneously taking into account the effects of low temperature and penetrating radiation in the LTspice, the methods for predicting the resistance of microcircuits to radiation defects, the modified combined transistor models, the radiation and low-temperature approximations of “Spice-parameters” of the JFETs.

The results of testing the proposed simulation tools for creating two libraries of parameters are presented: MH2XA030\_25.03.20.lib for the elements of the bipolar-field array chip and CJFET\_25.03.20.lib for various designs of the complementary JFETs.

In the MH2XA030\_25.03.20.lib library, the penetrating radiation exposure is taken into account by using the combined models, the temperature dependences of the BJT are described by the averaged temperature coefficients, and the temperature change in the CVC of the JFET is considered with the help of the low-temperature approximation of the

“Spice-parameter” BETA and the averaged temperature coefficient for the VTO.

In the library CJFET\_25.03.20.lib, the effects of penetrating radiation and low temperatures are taken into account by applying the radiation and low-temperature approximations of the “Spice-parameters” BETA and VTO, and the effect of the neutron fluence is described on the basis of the experimental data for the fast electrons.

On the basis of the analysis of the experimental dependence of  $\sqrt{I_D}$  on  $V_{GS}$ , it has been decided to create a separate set of the JFET model parameters for the drain current of less than 1  $\mu A$ . The JFET CVC simulation results are compared with the measurements in the variation range of the drain current from tens of nA to hundreds of  $\mu A$  and temperatures from -200°C to 30°C. Adequacy of the models with the identified parameters sufficient for designing analog microcircuits has been established. The largest disagreement between the measurements and simulation is observed for the output CVC of the n-JFET at the drain currents less than 1  $\mu A$ , which is explained by the imperfection of the used Shikhman–Hodges model. Thus, the identified parameters of the n-JFET model can be used only for the evaluative simulation of the CVC at the drain currents less than 1  $\mu A$ .

**Keywords** — “Spice-models”, circuit simulation, radiation hardness, cryogenic electronics.

#### SUPPORT

The study has been carried out at the expense of the grant from the Russian Science Foundation (Project No. 16-19-00122-P).

#### REFERENCES

- [1] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998507.
- [2] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N. and Bugakova A.V. Basic Parameters and Characteristics of the Op-Amp Based on the BiJFet Array Chip MH2XA030 Intended for the Design of Radiation-Hardened and Cryogenic Analog ICs // 2018 14TH International Scientific technical Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, October 2-6, 2018. P. 200-207. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545562.
- [3] Dvornikov O.V., Chekhovskiy V.A., Dyatlov V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovskiy S.B. Izmeneniye parametrov komplementarnykh bipolyarnykh tranzistorov pri vozdeystvii ioniziruyushchikh izlucheniy (Change of the parameters of the complementary BiFETs when exposed to the ionizing radiation) // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiatsionnogo vozdeystviya na radioelektronnyy apparaturu. 2015. Vyp. 3. S. 17-22 (in Russian).
- [4] Dvornikov O.V., Tchekhovskiy V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors // Russian Microelectronics. 2016. Vol. 45. No. 1. P. 54-62. DOI: 10.1134/S1063739716010030.
- [5] Dvornikov O., Dziatlau V., Tchekhovskiy V., Prokopenko N., Zhuk A., Bugakova A. Modernization of Low-Temperature JFET Models Built into LTSpice CAD Systems, Taking into Account the Results of their Experimental Study // Latin American Electron Devices Conference (LAEDC-2020). San José, Costa Rica, February 25 - 28, 2020.
- [6] Radiatsionnytsentr GNPO «Nauchno-Prakticheskii Tsentr NAN Belarusi po Materialovedeniyu» (Radiation Centre SSPA “Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus”) // Spravochnik tsentrov kollektivnogo pol'zovaniya unikal'nym nauchnym oborudovaniem i priborami. 4-ivypusk. Minsk, SO «BELISA», 2008. P. 40-41.
- [7] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Software and hardware complex for studying semiconductor devices at low, incl. cryogenic, temperatures // 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon). DOI:10.1109/URALCON.2017.8120719.
- [8] Dvornikov O., Shul'gevich Yu. Metody identifikatsii parametrov modeley integral'nykh tranzistorov. Chast' 2. Identifikatsiya parametrov modeli, opisuyayushchikh vol'tampernyye kharakteristiki bipolyarnykh tranzistorov (Methods for identifying the parameters of integrated transistor models Part 2. Identification of model parameters describing the current-voltage characteristics of bipolar transistors) // Sovremennaya elektronika. 2009. № 6. S. 52-61 (in Russian).
- [9] Dvornikov O., Shul'gevich Yu. Metody identifikatsii parametrov modeley integral'nykh tranzistorov. Chast' 4. Identifikatsiya parametrov modeli Shikhmana-Khodzhesa polevogo tranzistora s p-n- perekhodom (Methods for identifying the parameters of integrated transistor models. Part 4. Identification of the parameters of the Shikhman-Hodges model of p-n JFETs) // Sovremennaya elektronika. 2009. № 8. S. 50-57 (in Russian).
- [10] URL: <http://mnipi.by/articles/kontrol-elektricheskikh-parametrov-elektronnykh-komponentov.html>
- [11] Dvornikov O.V., Grishkov V.N. Kompleksnyy podkhod k proyektirovaniyu radiatsionno-stoykikh analogovykh mikroskhem. Chast' 1. Uchet vliyaniya pronikayushchey radiatsii v “Spice-podobnykh” programmakh (An integrated approach to the design of radiation-hardened analog microcircuits. Part 1. Taking into account the influence of penetrating radiation in “Spice-like” programs) // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2010. Sbornik trudov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii / pod obshch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. M.: IPPM RAN, 2010. S. 301-306 (in Russian).
- [12] Dvornikov O., Shul'gevich Yu. Metody identifikatsii parametrov modeley integral'nykh tranzistorov. Chast' 1. Raschet «Spice-parametrov» bipolyarnykh tranzistorov s ispol'zovaniyem konstruktivno-tekhnologicheskikh i elektrofizicheskikh parametrov (Methods for identifying the parameters of integrated transistor models. Part 1. Calculation of "Spice-parameters" of bipolar transistors using structural, technological and electrophysical parameters) // Sovremennaya elektronika. 2009. № 5. S. 48-53 (in Russian).
- [13] Dvornikov O.V., Chekhovskiy V.A., Dyatlov V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovskiy S.B. Prognozirovaniye stoykosti bipolyarnykh mikroskhem k razlichnym vidam pronikayushchikh izlucheniy (Prediction of the resistance of bipolar microcircuits to various types of penetrating radiation) // Materialy 23-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii «SVCh-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii» (Sevastopol', 8-13 sent. 2013 g.). T. 2. S. 925-927 (in Russian).
- [14] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovskiy V.A., Prokopenko N.N. and Bugakova A.V. BiJFet Array Chip MH2XA030 — a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). 22-23.10.2018, Saint Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.
- [15] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovskiy V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. Influence of Penetrating Radiation on Current-Voltage Characteristics of Complementary JFETs // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). October 17-18, 2019, Saint Petersburg, Russia. P. 1-4. DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906794.