

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук (ИППМ РАН)**

Библиотека схемотехнических решений

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ JFET И
BJ-ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ
ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ
РАДИАЦИИ**

О.В. Дворников¹, oleg_dvornikov@tut.by, В.А. Чеховский², vtchek@hep.by,
Н.Н. Прокопенко^{3,4}, prokopenko@sssu.ru, Я.Д. Галкин⁵, galkinyaroslav@gmail.com,
А.В. Кунц⁵, serphentos.dwarf@gmail.com, А.В. Бугакова³, annabugakova.1992@mail.ru

¹ОАО "Минский научно-исследовательский приборостроительный институт"

²"Институт ядерных проблем" Белорусского государственного университета

³Донской государственный технический университет

⁴Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

⁵Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Рассмотрен комплекс средств, предназначенных для описания в "Spice-подобных" программах влияния гамма-излучения, потока нейтронов и низких температур на вольтамперные характеристики (ВАХ) биполярных транзисторов (Bipolar Junction Transistor, BJT) и полевых транзисторов с р-п-переходом (Junction Field Effect Transistor, JFET). Приведены параметры модернизированных моделей для BJT и JFET, изготовленных по двум технологическим маршрутам ОАО "ИНТЕГРАЛ", а также сравнение результатов измерений и моделирования основных ВАХ.

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

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 обзор созданного комплекса средств, позволяющего выполнять схемотехническое моделирование биполярно-полевых аналоговых ИС при одновременном воздействии низких температур и ПР, и результатов его апробации для двух технологических маршрутов ОАО "ИНТЕГРАЛ".

I. Комплекс средств схемотехнического моделирования

Для одновременного учета воздействия низких температур и ПР на параметры ВJT и JFET нами 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.

1.1 Выбор САПР и "Spice-моделей" [1, 2]

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

Моделирование при низких температурах типовых ВАХ ВJT позволило установить, что в OrCAD, HSPICE наблюдаются выбросы и искажения при температурах менее – 148°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 встроенных в САПР типовых моделей Гуммеля-Пуна, Шихмана–Ходжеса и математических выражений, устанавливающих взаимосвязь параметров моделей, полупроводника и радиационного облучения, а также усредненных температурных коэффициентов для параметров моделей или эмпирических аппроксимаций параметров моделей, например, для описания немонотонного изменения максимального тока стока и крутизны JFET в диапазоне температур от –200°C до 30°C.

1.2 Изучение радиационных и температурных изменений ВАХ [3 -5]

Облучение образцов гамма-квантами ^{60}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°C, а сами образцы были с закороченными выводами.

Низкотемпературные измерения проводились на экспериментальной установке с использованием методик, описанных в [7-9]. Измеряемые транзисторы располагались в металлическом стакане, помещаемом в жидкий азот с помощью штанги, через которую проходил жгут витых пар для подключения к измерителю параметров полупроводниковых приборов ИППП-1 [10]. Для контроля температуры была использована термопара типа М по ГОСТ-Р 8.585—2001 (Медь/Копель), расположенная около измеряемых транзисторов. Температура регистрировалась по методике «компенсации холодного спая», при которой свободный конец термопары располагался в стакане с водой и плавающим льдом. Термоэлектродвижущая сила термопары фиксировалась вольтметром В7-65 и передавалась на персональный компьютер через интерфейс RS-232.

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 BJT 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 Шихмана-Ходжеса 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 $VAF=1/LAMBDA$;

- для BJT определялось максимальное значение β и соответствующего ему I_E (β_{MAX} , I_{EMAX}), 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" BJT 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.

1.3 Особенности комбинированных моделей[11]

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

Так, на статические характеристики BJT 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]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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; τ – 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; μ_{NB} , μ_{CH} – подвижность электронов в базе n-p-n ВJT, основных носителей заряда в канале JFET; K_N , K_μ – 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); c , γ – 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-p-p при соответствующей замене переменных.

Совместное применение соотношений (1)–(12) позволяет описать радиационное изменение "Spice- параметров". Так, ниже приведен фрагмент описания модели n-p-n ВJT в соответствии с правилами "Spice-подобных" программ.

*Оценка относительного изменения концентрации
* в областях эмиттера (em), базы (pb), коллектора (ep)

.param Nnem={exp(-Fn/(444*pwr(Nem, 0.77)))}

.param Nnepi={exp(-Fn/(444*pwr(Nepi, 0.77)))}

.param Nnpb={exp(-Fn/(387*pwr(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

Однако для моделирования при любой величине поглощенной дозы эмпирический коэффициент fit, приведенный в табл. 1, был задан нами в виде полинома:

$$fit = 308,08 * [lgD_G]^3 - 2773,7 * [lgD_G]^2 + 8374,1 * lgD_G - 8444,3. \quad (13)$$

Ранее был экспериментально установлен эффект «самоотжига» (восстановления параметров) горизонтальных р-п-р- транзисторов при больших дозах облучения. Этот эффект может быть учтен в применяемой модели изменением математического выражения (13) таким образом, чтобы эмпирический коэффициент fit начал уменьшаться при больших поглощенных дозах.

Преимуществом предложенных комбинированных моделей является то, что они могут быть применены к различным технологическим маршрутам изготовления ИС, содержащих ВТТ и JFET, без дополнительных радиационных исследований за счет изменения исходных данных, характеризующих типовую структуру.

1.4 Использование радиационных и низкотемпературных аппроксимаций параметров "Spice-моделей" [1, 5, 13]

Типовая модель Шихмана-Ходжеса JFET не описывает немонотонное изменение его характеристик при низких температурах, а именно увеличение максимального тока стока I_{DMA} ($I_{DMA}=I_D$ при $V_{GS}=0$, $V_{DS}=V_{TH}$) и крутизны при уменьшении температуры ориентировочно до $-110^{\circ}C...-130^{\circ}C$, 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 (T – температура в градусах Цельсия)

$$BETA = -3,1571E-12T^4 + 3,4164E-10T^3 + 1,1255E-07T^2 - 1,3408E-05T + 2,9107E-03. \quad (14)$$

Совпадение измеренных величин $BETA$ и выражения (14) показано на рис. 1.

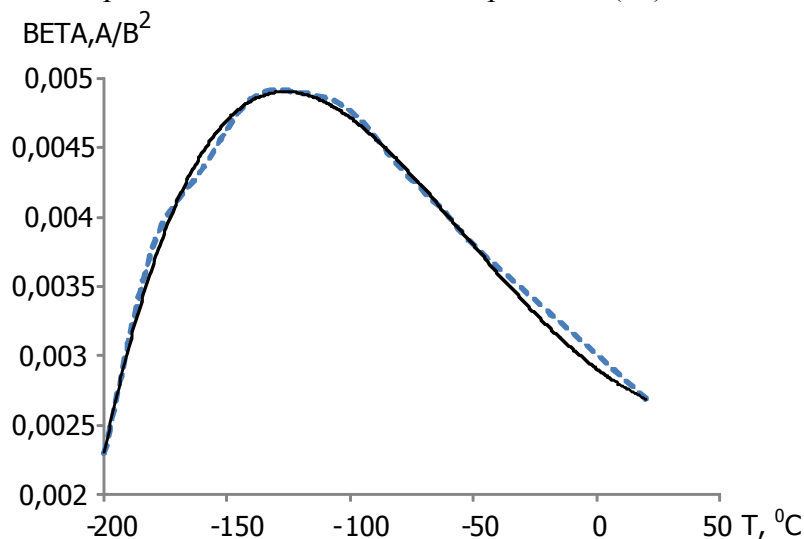


Рис. 1. Зависимость измеренного параметра $BETA$ (пунктирная линия) и рассчитанного по выражению (14) (сплошная линия) от температуры для транзисторов АБМК-1.3

В то же время температурная зависимость параметра V_{TO} остается без изменений и описывается встроенными в LTspice математическими выражениями.

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

```
.param bL={-3.16p*pow(LT,4)+0.342n*pow(LT,3)+0.113u*pow(LT,2)-13.4u*LT+2.91m}
+Vto={-2*Nsumpch}
+beta={bL*Msumpch}
+lambdа={0.015*pwr(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}.

Результаты моделирования $I_D=f(V_{GS})$ для транзисторов АБМК-1.3 в диапазоне температур показаны на рис. 2.

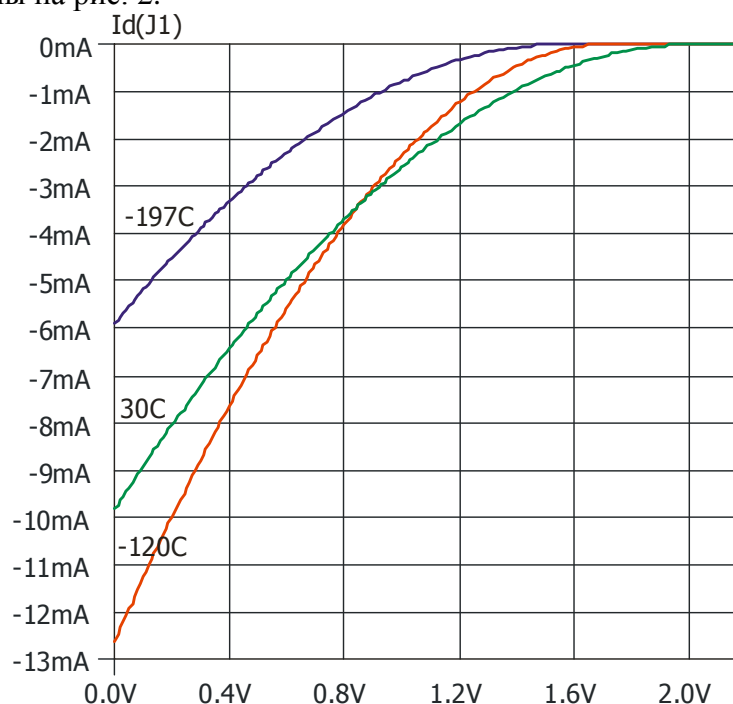


Рис. 2. Результаты моделирования зависимости I_D от V_{GS} при $V_{SD}=3$ p-JFET АБМК-1.3 в диапазоне температур. Директивы управления:

```
.step param LT list -197 -120 30
.dc Vgs 0 3 10m temp list {LT}
.param LT=30
.param Fn=1
.param Dg=1
.param fit=1
```

Рассмотренный выше подход, включающий применение комбинированных моделей совместно с полученной аппроксимацией температурной зависимости "Spice-параметра" BETA применен нами для описания ВАХ транзисторов, изготовленных по биполярно-полевой технологии.

Такое описание радиационных и температурных изменений ВАХ возможно в том случае, когда известны параметры типовой структуры (концентрации и глубины залегания полупроводниковый 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 $I_{D_{MAX}}$, VAF и напряжения отсечки V_{TH} (рис. 3-7);

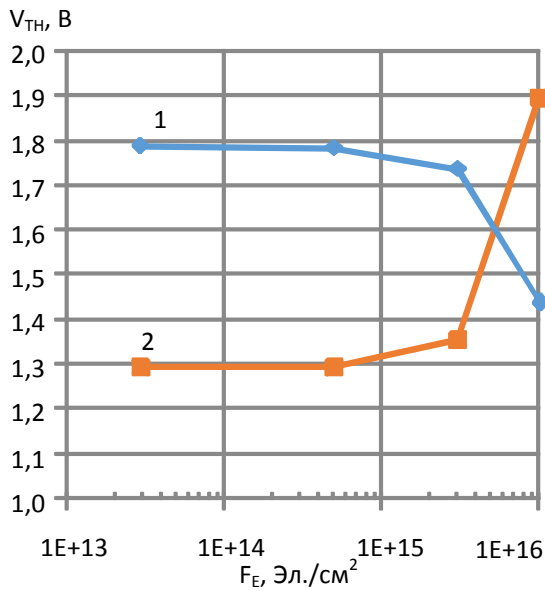


Рис. 3. Результаты измерений зависимости напряжения отсечки V_{TH} от флюенса «быстрых» электронов F_E : 1) p-JFET; 2) n-JFET

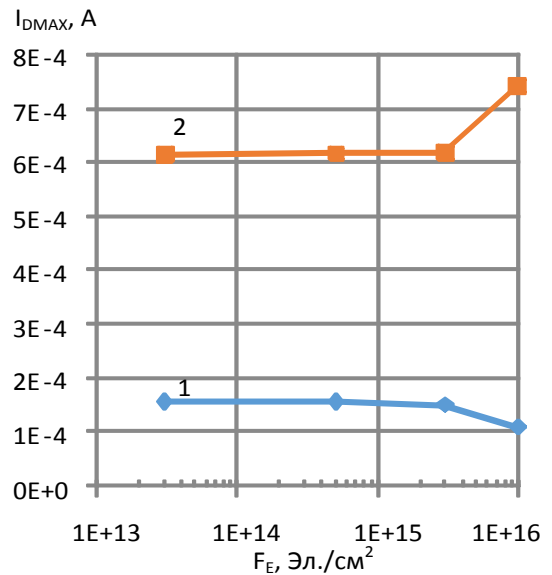


Рис. 4. Результаты измерений зависимости максимального тока стока I_{DMAX} от F_E : 1) p-JFET; 2) n-JFET

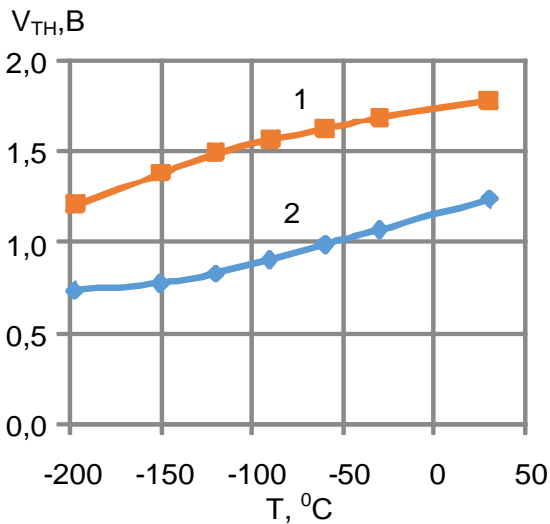


Рис. 5. Результаты измерений зависимости напряжения отсечки V_{TH} от температуры: 1) p-JFET; 2) n-JFET

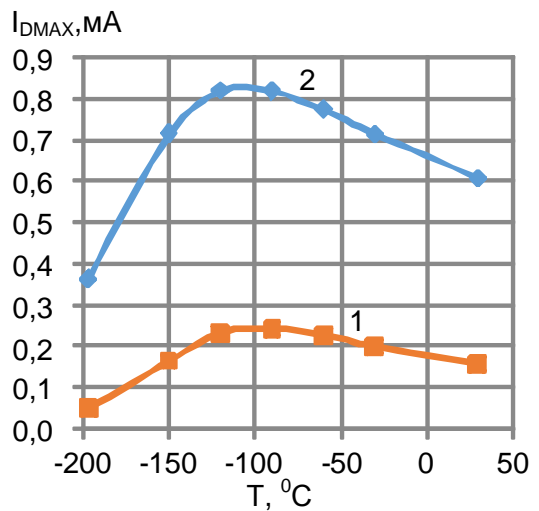


Рис. 6. Результаты измерений зависимости максимального тока стока I_{DMAX} от температуры: 1) p-JFET; 2) n-JFET

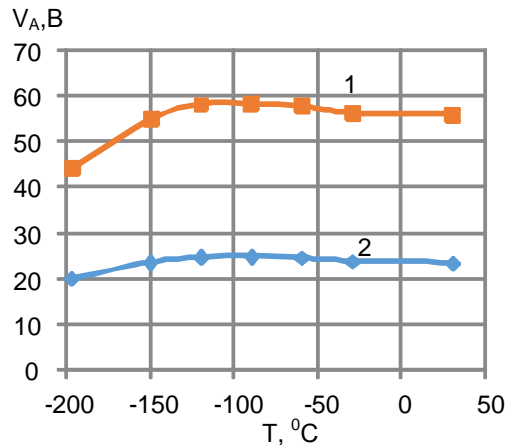


Рис. 7. Результаты измерений зависимости напряжения Эрли V_A от температуры: 1) p-JFET; 2) n-JFET

- получены радиационные и температурные аппроксимации зависимостей;
- аппроксимации встроены в модель Шихмана-Ходжеса;
- проведено моделирование ВАХ и сравнение их с результатами измерений.

В диапазоне флюенсов «быстрых» электронов от $3 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{16}$ эл./см² изменение V_{TH} и $I_{D_{MAX}}$ можно аппроксимировать следующими зависимостями для p-JFET

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

$$I_{D_{MAX}} = -3,6952 \cdot 10^{-37} F_E^2 - 1,0837 \cdot 10^{-21} F_E + 1,5752 \cdot 10^{-4}, \quad (15)$$

для n-JFET

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

$$I_{D_{MAX}} = 1,6369 \cdot 10^{-36} F_E^2 - 3,5925 \cdot 10^{-21} F_E + 6,1516 \cdot 10^{-4}. \quad (17)$$

Изменение напряжения отсечки с уменьшением температуры допустимо аппроксимировать следующими выражениями (Т - температура в градусах Цельсия) 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 λ), идентифицированного из выходных ВАХ, в диапазоне температур от -150 °С до 30 °С можно пренебречь.

Для учета экспериментальных данных в модели Шихмана-Ходжеса, встроенной в программе LTspice, исключена температурная зависимость параметра $BETA$, V_{TO} за счет установки величин параметров $\beta_{TCE} = -1e-9$, $V_{TOC} = -1e-9$. Описание температурного влияния осуществлено с помощью глобального параметра LT и новых математических соотношений, описывающих в соответствии с правилами LTspice зависимость $BETA$ и V_{TO} от LT по формулам (14)-(17). Ниже приведен пример модели p-JFET:

```
.model JP50_6 PJF
.param VTOP = {-6.63u*pow(LT,2)+1.42m*LT+1.745}
.param bPL1 = {-2.268n*pow(LT,2)-0.1952u*LT+63.51u}
.param bPL = {-3.858f*pow(LT,5)-1.577p*pow(LT,4)-0.1636n*pow(LT,3)+bPL1}
+Vto = {-VTOP}
+beta = {bPL}
+VtoTC = -1e-9
+betaTCE = -1e-9
+lambda = 0.0179
+Is = 0.36E-16
+Rd = 77
+Rs = 77
+Cgd = 0.769p
+Cgs = 0.769p
+FC = 0.5
+PB = .8
```

1.5 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. 8 приведена типовая схема включения ВТТ и JFET при моделировании, а на рис. 9-11 – результаты моделирования с применяемыми директивами управления. В подрисовочных подписях:

- LT - глобальный параметр, описывающий температуру в градусах Цельсия,
- поток нейтронов с размерностью н/м² устанавливался по директиве .param Fn=значение [н/м²],
- 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}
```

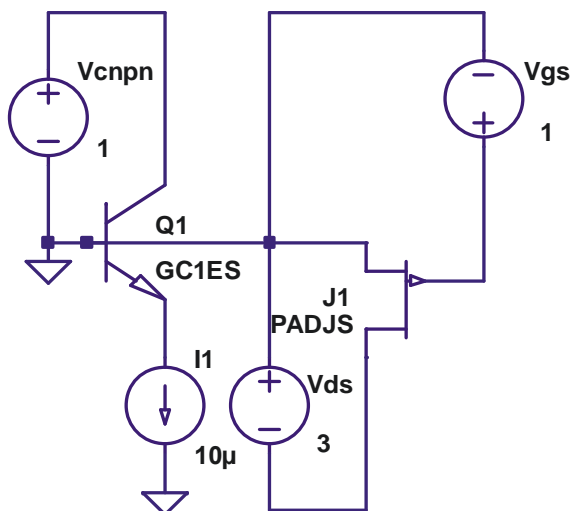


Рис. 8. Типовая схема включения ВТТ и JFET при моделировании ВАХ

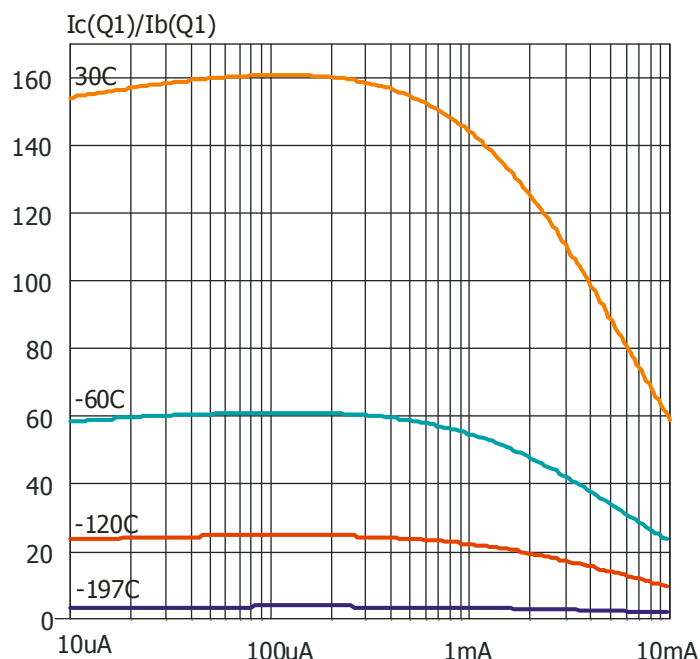


Рис. 9. Результаты моделирования для n-p-n-транзистора АБМК-1.3 зависимости β от I_E при $V_{CB}=1$, разных температурах, без воздействия ПР. Директивы управления:

```
.step param LT list -197 -120 -60 30
.dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}
.param LT=30
.param Fn=1
.param Dg=1
.param fit=1
```

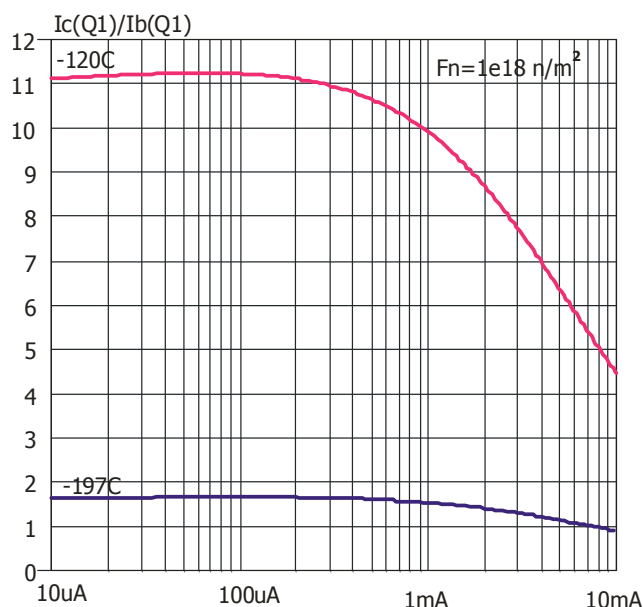


Рис. 10. Результаты моделирования для n-p-n-транзистора АБМК-1.3 зависимости β от I_E при $V_{CB}=1$, разных температурах и воздействии флюенса нейтронов $F_N=10^{14}$ н/см². Директивы управления:
 .step param LT list -197 -120
 .dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}
 .param LT=30
 .param Fn=1e18
 .param Dg=1
 .param fit=1

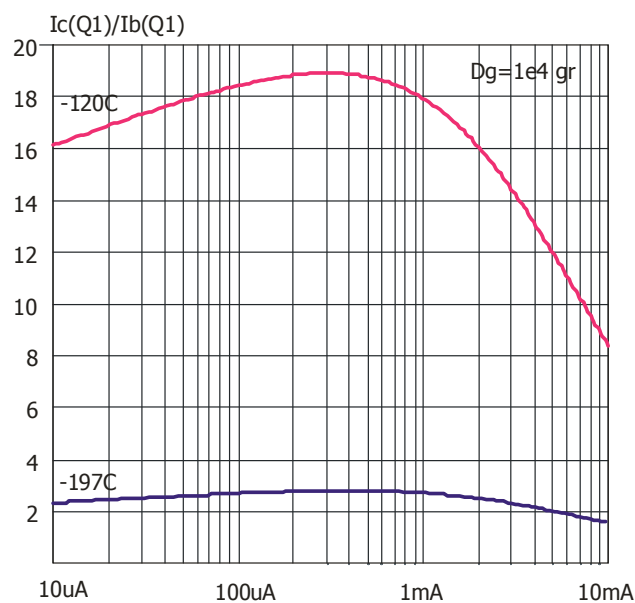


Рис. 11. Результаты моделирования для n-p-n-транзистора АБМК-1.3 зависимости β от I_E при $V_{CB}=1$, разных температурах и поглощенной дозе гамма-облучения $D_G=1$ Мрад. Директивы управления:
 .step param LT list -197 -120
 .dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}
 .param LT=30
 .param Fn=1
 .param Dg=1e4
 .param fit=410.913

1.6 Прогнозирование стойкости ИС к радиационным дефектам на основе экспериментальных данных, полученных при облучении "быстрыми" электронами [14]

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:

$$N_{DE} = F_E v_E \sigma_{DE} n_A \rho, \quad (22)$$

$$N_{DP} = F_P v_P \sigma_{DP} n_A \rho, \quad (23)$$

$$N_{DN} = F_N v_N \sigma_{DN} n_A \rho, \quad (24)$$

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; σ_{DE} , σ_{DP} , σ_{DN} – сечение смещения атома-мишени при облучении электронами, протонами и нейтронами соответственно; n_A – число атомов облучаемого вещества, приходящееся на 1 кг массы; ρ – удельная плотность.

Экспериментальные значения коэффициентов v и σ в зависимости от энергии частиц приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Среднее число смещенных атомов в зависимости от энергии частиц

E, МэВ	ν_N	ν_P	ν_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	σ_{DN}, M^2	σ_{DP}, M^2	σ_{DE}, M^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.

II. Описание созданных библиотек параметров [15-17]

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".

2.1 Библиотека параметров MN2XA030_25.03.20.lib

В рассматриваемой библиотеке учет воздействия ПР осуществлен путем применения комбинированных моделей, температурные зависимости ВJT описаны температурными коэффициентами, усредненными в диапазоне температур от -200°C до 30°C , а температурное изменение ВАХ JFET - низкотемпературной аппроксимацией "Spice-параметра" BETA и усредненным температурным коэффициентом для VTO.

Библиотека содержит:

- модели с названием **npr, pnp, JFET** малосигнальных транзисторов БМК с топологическим размером эмиттера $1,5 \text{ мкм} \times 7 \text{ мкм}$ и p-JFET с размером затвора $1,5 \text{ мкм} \times 16,5 \text{ мкм}$. Для упрочнения транзисторов, т.е. сдвига максимума зависимости $\beta=f(I_C)$ в область больших коллекторных токов, рекомендуется выполнять параллельное соединение транзисторов одного типа. На БМК имеется ограниченное количество мощных транзисторов, для которых рекомендуется применение указанных моделей с масштабирующим коэффициентом AREA=21 для npr, AREA=14 для pnp, AREA=39 для JFET. Мощные ВJT характеризуются малым сопротивлением базы, которое является основным источником "белого" шума, а мощный p-JFET обладает большой крутизной,

поэтому мощные транзисторы целесообразно применять в качестве входных элементов малошумящих схем;

- модель диода с названием **DST**, которая описывает пробой эмиттерного перехода n-p-n-транзистора. Рекомендуется при использовании диода в качестве стабилитрона;

- модель с названием **DgSub** паразитного диода, подключаемого к затвору p-JFET. Рекомендуется подключение диода с этой моделью и AREA=39 к затвору мощного p-JFET при выполнении AC 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 AC 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. Требуемое в схеме сопротивление резисторов получают за счет последовательного и/или параллельного соединения резисторов указанных номиналов.

"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. Их подключение осуществляется удалением символа "*" из первой позиции строки.

Например, не влияющие на моделирование значения будут описаны как

```
.param Dg=1
.param fit=1
*Dg=5e4 gray, 5Mrad
*.param fit=1627.149
```

Используемые при поглощенной дозе 5 Мрад значения будут описаны как

```
*.param Dg=1
*.param fit=1
.param Dg=5e4
.param fit=1627.149
```

2. Изменение ВАХ при воздействии нейтронов заданием величины флюенса (параметр Fn с размерностью м⁻²). Рекомендуется, чтобы значение флюенса не превышало 10¹⁴ см⁻², т.к. только при этих значениях флюенса модель проверена экспериментально по данным полученным для "быстрых" электронов и методике раздела 1.6. Моделирование воздействия нейтронов можно выполнить при параметрическом анализе.

Например, для нормальных условий и типичных флюенсов 5·10¹³ см⁻², 3·10¹⁴ 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, который равен значению температуры в градусах Цельсия

```
.param LT=30
```

Параметры модели экспериментально апробированы в диапазоне температур от минус 200°С до 30°С.

4. Технологический разброс падения напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе n-p-n и p-n-p- транзисторов изменением параметра NPNscale, PNPscale; разброс β - параметром BFscale; разброс ВАХ p-JFET - параметром VTOValue; разброс сопротивлений резисторов - параметрами Rpscale, Rprscale.

Типовые директивы управления при моделировании технологического разброса приведены ниже

```
*technological parameter variations
```

```

*.STEP param NPNscale LIST .9 1 1.1
*.STEP param PNPscale LIST .9 1 1.1
*.STEP param Rpscale LIST .9 1 1.1
*.STEP param Rprscale LIST .9 1 1.1
*.STEP param VTOValue LIST 1.0 1.5 2.0
*.STEP param BFscaleLIST .4 1

```

Как указывалось ранее, удалением символа "*" из первой позиции строки осуществляется подключение соответствующего вида параметрического анализа.

Ниже приведен пример моделей для САПР LTSpice.

```

.param bL={-3.16p*pow(LT, 4)+0.342n*pow(LT, 3)+0.113u*pow(LT, 2)-13.4u*LT+2.91m}
.model npn npn
+IS={3.8e-017*NPNscale*Msumpb/Nsumpb}
+nf=1
+nr=1
+BF={1/(7.58e-011*Delnpb+1/(121.5*BFscale*Nsumem/Nsumpb))}
+IKF={0.0058*Nsumpb*Msumpb}
+ISE={5.9e-019+(1.8e12*vgsurf*Pemnpn*(Wmpb+1u))/(Npb*Nsumpb)}
+ne=1.073
+br=5.108
+ikr=0.00139
+isc=3.76e-016
+nc=1.232
+RE={4.46/(NPNscale*Nsumem)}
+RC={39.1/(NPNscale*Nsumem)}
+RB={14.5/(NPNscale*Nsumpb)}
+RBM={8.13/(NPNscale*Nsumpb)}
+irb=0.62e-005
+VAF={48*Nsumpb/sqrt(Nsumepi)}
+var=6.772
+tf={7.58e-011/(NPNscale*NPNscale*Msumpb)}
+tr=2.174e-011
+cje=0.632e-013
+mje=0.2958
+vje=0.7748
+cjc=4.29e-014
+mjc=0.2553
+vjc=0.5523
+cjs=3.34e-013
+mjs=0.1056
+vjs=0.4282
+xtb=2.73
+xti=6.0
+eg=1.11
*
.model JFET PJF
+Vto={-1.04*VTOValue*Nsumpch}
+beta={bL*11.3m*Msumpch*sqrt(VTOValue/2.1)}
+lambd={0.027*pwr(Nsumpch,-0.5)}
+Is=1.09E-16
+Rd={235/Nsumpb}
+Rs={235/Nsumpb}
+Cgd=0.132p
+Cgs=0.132p
+FC=0.5
+PB=.8
+VtoTC=-0.002
+betaTCE=-1e-6
*

```

Для того, чтобы убедиться в правильности установки требуемых глобальных параметров Dg, Fn, LT и подключении библиотеки MN2XA030_25.03.20.lib к создаваемой схеме, перед моделированием схемы рекомендуется провести DC-анализ типовой схемы

включения ВТ или JFET, показанной на рис. 8, и выявить влияние изменения параметров на ВАХ.

На рис. 12-19 приведены результаты моделирования зависимости $\beta=f(I_E)$ и основных ВАХ при изменении внешних воздействий.

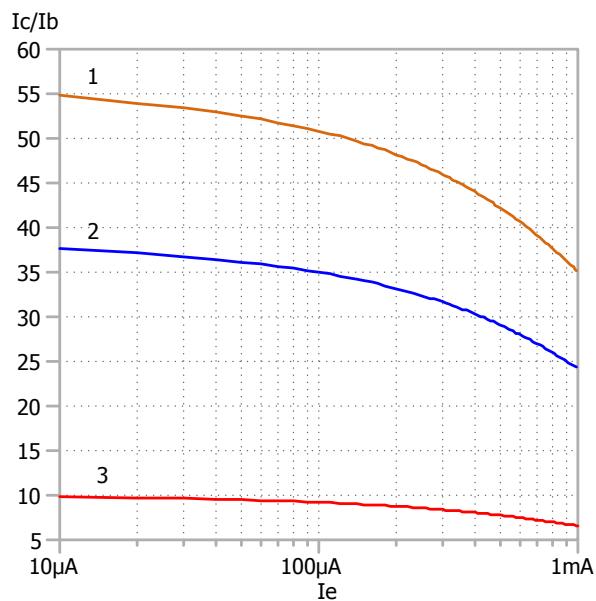
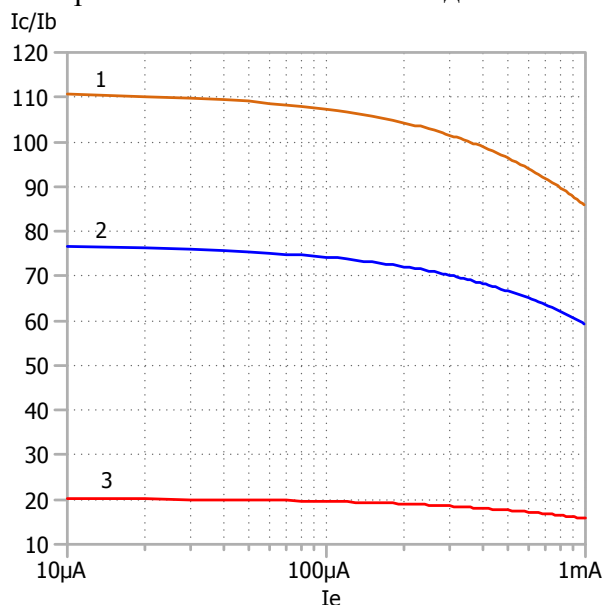


Рис. 12. Результаты моделирования зависимости β маломощного п-р-п-транзистора БМК от эмиттерного тока при $T = 30^\circ\text{C}$ и разных потоках нейтронов: 1 - 1 н./см^2 , 2 - 10^{13} н./см^2 , 3 - 10^{14} н./см^2

Рис. 13. Результаты моделирования зависимости β маломощного р-п-р-транзистора БМК от эмиттерного тока при $T = 30^\circ\text{C}$ и разных потоках нейтронов: 1 - 1 н./см^2 , 2 - 10^{13} н./см^2 , 3 - 10^{14} н./см^2

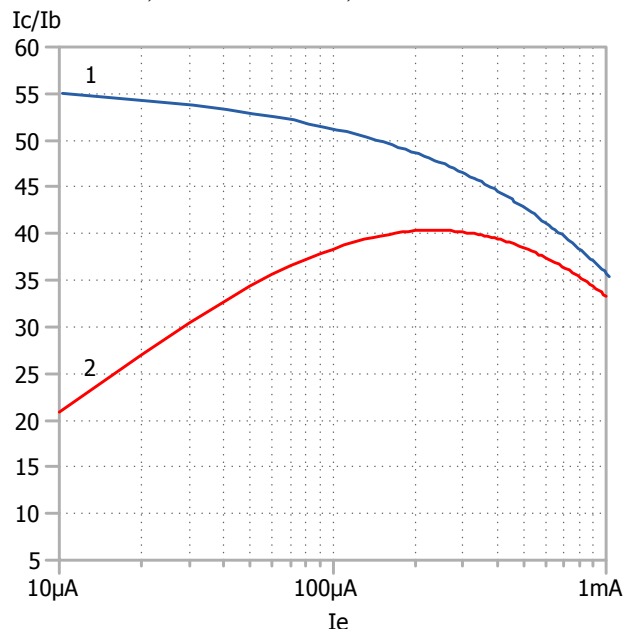
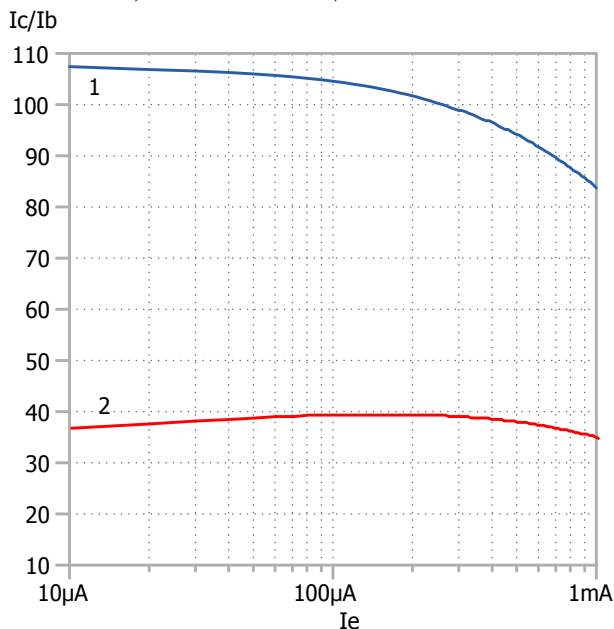


Рис. 14. Результаты моделирования зависимости β маломощного п-р-п-транзистора БМК от эмиттерного тока при $T = 30^\circ\text{C}$ и разных поглощенных дозах гамма-излучения: 1 - 1 рад, 2 - 3 Мрад

Рис. 15. Результаты моделирования зависимости β маломощного р-п-р-транзистора БМК от эмиттерного тока при $T = 30^\circ\text{C}$ и разных поглощенных дозах гамма-излучения: 1 - 1 рад, 2 - 3 Мрад

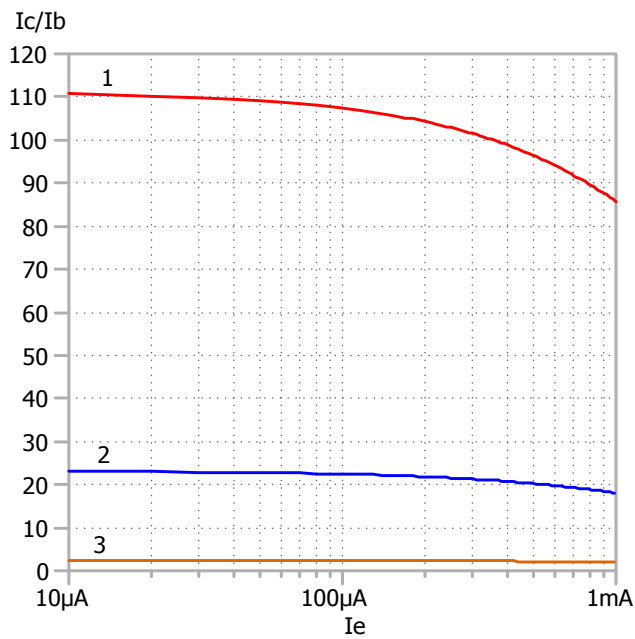


Рис. 16. Результаты моделирования зависимости β маломощного p-n-p транзистора БМК от эмиттерного тока при разных температурах: 1 - 30°C, 2 - минус 100°C, 3 - минус 197°C

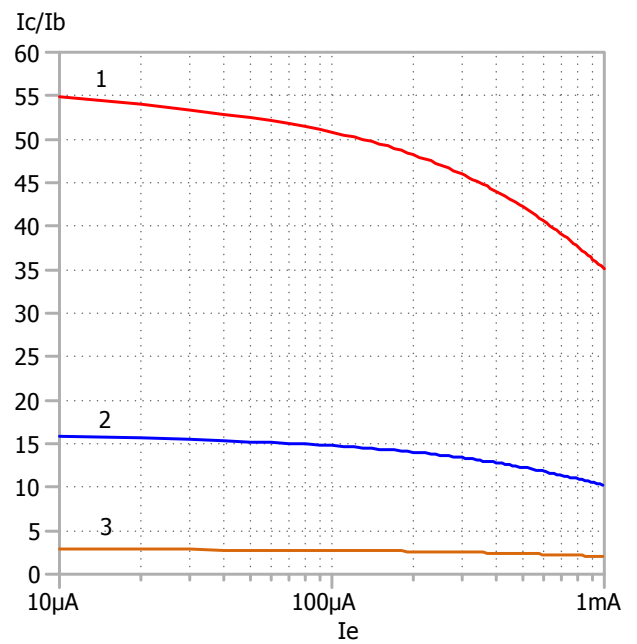


Рис. 17. Результаты моделирования зависимости β маломощного p-n-p транзистора БМК от эмиттерного тока при разных температурах: 1 - 30°C, 2 - минус 100°C, 3 - минус 197°C

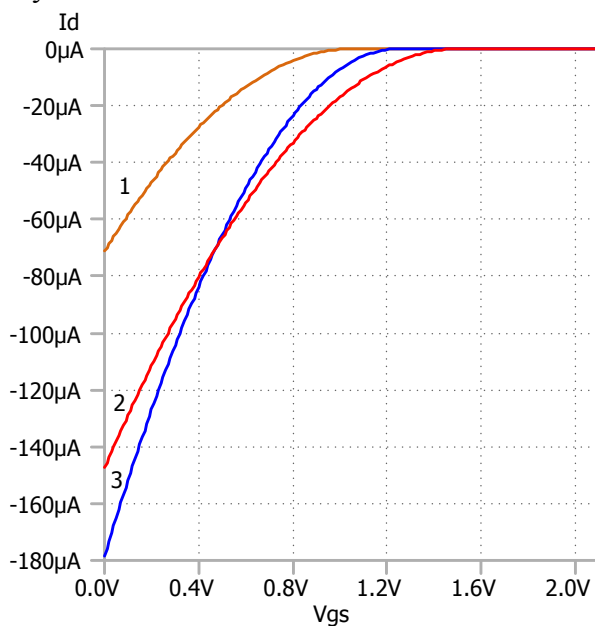


Рис. 18. Результаты моделирования зависимости I_D от V_{GS} маломощного p-JFET БМК при $V_{SD} = 3$ В и разных температурах: 1 - минус 197°C ($V_{TH} = 1,04$ В), 2 - 30°C ($V_{TH} = 1,5$ В), 3 - минус 100°C ($V_{TH} = 1,24$ В)

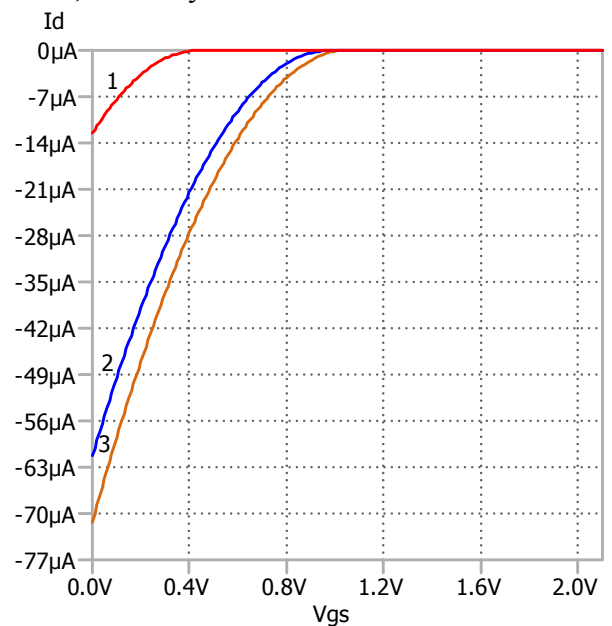


Рис. 19. Результаты моделирования зависимости I_D от V_{GS} маломощного p-JFET БМК при минус 197°C, $V_{SD} = 3$ В и разных потоках нейтронов: 1 - 10^{15} н./см² ($V_{TH} = 0,43$ В), 2 - 10^{14} н./см² ($V_{TH} = 0,97$ В), 3 - 1 н./см² ($V_{TH} = 1,04$ В)

2.2 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 1.6.

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; **JP50_2** – p-JFET с $W=50$ мкм, $L=2$ мкм;

- модели JFET с названием **JN260_6u**, **JP50_6u**, подстроенные для применения при токах стока от 50 нА до 1 мкА;

- увеличение крутизны JFET за счет увеличения ширины затвора можно обеспечить параллельным соединением JFET или выбором масштабирующего коэффициента $AREA>1$. В последнем случае надо обратить внимание на то, что суммарная ширина затвора $W \cdot AREA$ должна быть кратна единицам мкм. JFET с большой крутизной целесообразно применять в качестве входных элементов малощумящих схем;

- увеличение малосигнального выходного сопротивления в области насыщения ВАХ обеспечивается последовательным соединением JFET;

- модели с названием **DJP50_6**, **DJP50_4**, **DJP50_2**, **DJN260_6**, **DJN260_4**, **DJN260_2** паразитных диодов, подключаемых к затворам соответствующих JFET при необходимости корректного выполнения АС и TRAN-анализа. Коэффициент $AREA$ паразитных диодов должен равняться коэффициенту $AREA$ применяемого JFET. Учет паразитных диодов целесообразен для транзисторов с большой площадью, ориентировочно, при $AREA \geq 5$ для **JP50_6**, $AREA \geq 2$ для **JN260_6**;

- модель с названием **DCmos05** паразитного диода полупроводниковой обкладки МОП-конденсатора 0,5 пФ. Рекомендуется подключение диода с этой моделью и масштабирующим коэффициентом $AREA$, равным отношению емкости применяемого конденсатора к значению 0,5 пФ, при выполнении АС и TRAN-анализа;

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

- модель с названием **npr**. Параметры этой модели предоставлены ОАО «ИНТЕГРАЛ» и описывают ВАХ в диапазоне температур от минус 60°C до 80°C и не учитывают воздействие ПР.

"Spice-параметры" библиотеки позволяют описать:

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

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 5e13 3e14
```

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 , который равен значению температуры в градусах Цельсия

```
.param LT=30
```

Параметры модели экспериментально апробированы в диапазоне температур от минус 200°C до 30°C.

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

*technological parameter variations

*.STEP param Rpscale LIST .9 1 1.1

*.STEP param Rprscale LIST .9 1 1.1

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

Анализ зависимости $\sqrt{I_D}$ от V_{GS} (рис. 20, 21) и I_D/I_{D10V} от V_{DS} (рис. 22, 23) позволил установить, что для тока стока менее 1 мкА требуется отдельный набор параметров моделей.

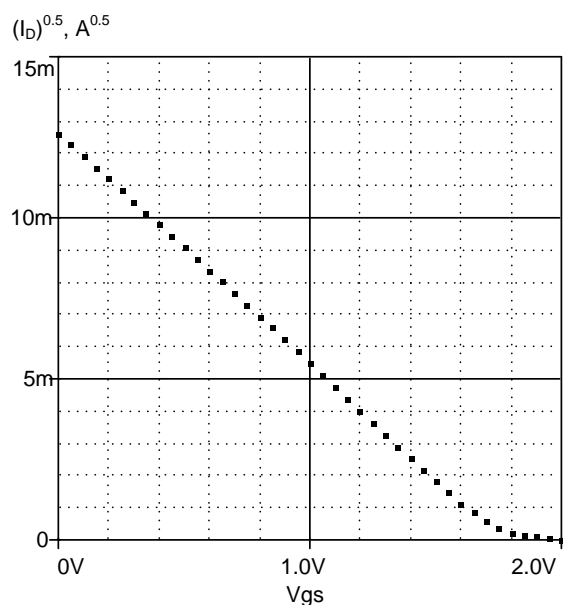


Рис. 20. Результаты измерений зависимости $\sqrt{I_D}$ от V_{GS} для p-JFET при $V_{DS}=-5$ В

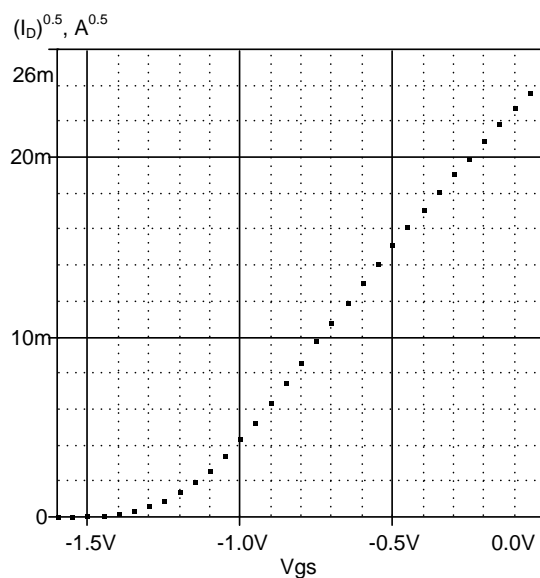


Рис. 21. Результаты измерений зависимости $\sqrt{I_D}$ от V_{GS} для n-JFET при $V_{DS}=5$ В

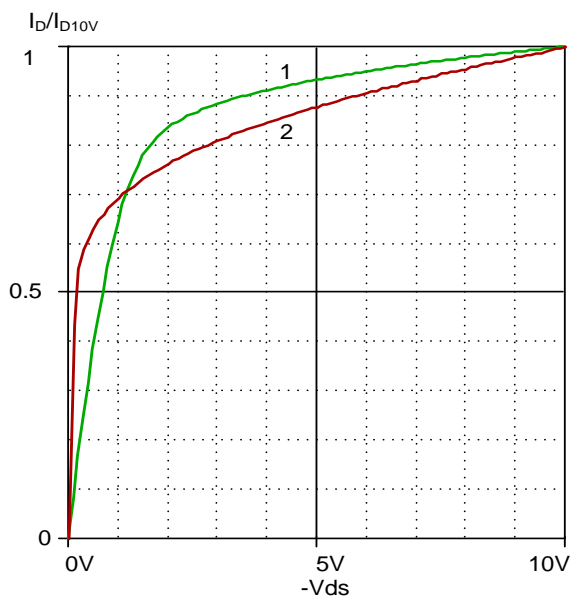


Рис. 22. Результаты измерений зависимости нормированного тока стока I_D/I_{D10V} от V_{DS} для p-JFET: 1 - $I_{D10V}=172,25$ мкА, 2 - $I_{D10V}=0,856$ мкА

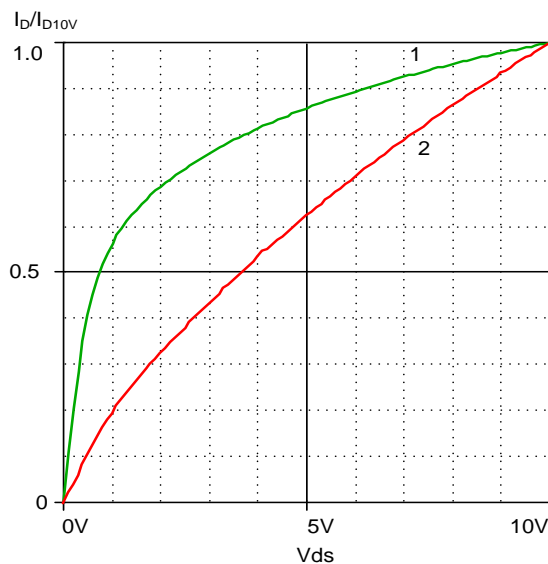


Рис. 23. Результаты измерений зависимости нормированного тока стока I_D/I_{D10V} от V_{DS} для n-JFET: 1 - $I_{D10V}=570,83$ мкА, 2 - $I_{D10V}=1,268$ мкА

Таким образом, модели **JN260_6**, **JN260_4**, **JN260_2**, **JP50_6**, **JP50_4**, **JP50_2** рекомендуется применять для тока стока более 10 мкА, а для тока стока от 50 нА до 1 мкА - **JN260_6u**, **JP50_6u**.

Заметим, что:

- модели **JN260_6u**, **JP50_6u** учитывают радиационное и низкотемпературное изменение параметров, однако коэффициенты, описывающие радиационное и низкотемпературное влияние, определены при измерениях JFET для токов стока более 10 мкА,

- адекватность модели **JP50_6u** для p-JFET хорошая, а **JN260_6u** для n-JFET достаточна только для оценочного моделирования

Ниже приведен пример моделей для САПР LTSpice.

```
.param FE={FN/0.377}
.param bNL1={-67.67n*pow(LT,2)-1.868u*LT+0.6287m}
.param bNE={1.0226E-32*pow(FE,2)-1.8439E-16*FE+1.0066}
.param bNL={(-45.95f*pow(LT,5)-21.91p*pow(LT,4)-2.83n*pow(LT,3)+bNL1)*bNE}
.param bPL1={-2.268n*pow(LT,2)-0.1952u*LT+63.51u}
.param bPE={-4.1352E-33*pow(FE,2)-5.2501E-17*FE+.99951}
.param bPL={(-3.86f*pow(LT,5)-1.58p*pow(LT,4)-0.164n*pow(LT,3)+bPL1)*bPE}
.param VTONE = {2.4095E-32*pow(FE,2)+8.2758E-17*FE+.99819}
.param VTON = {(5.1u*pow(LT,2)+3.145m*LT+1.147)*VTONE}
.param VTOPE = {-4.1352E-33*pow(FE,2)-5.2501E-17*FE+.99951}
.param VTOP = {(-6.63u*pow(LT,2)+1.42m*LT+1.745)*VTOPE}
*
```

```
** SPICE LIBRARY
```

```
.model JP50_6 PJF
```

```
+Vto={-VTOP}
```

```
+beta={bPL*0.82}
```

```
+lambda=0.0179
```

```
+Is=0.36E-16
```

```
+Rd=77
```

```
+Rs=77
```

```
+Cgd=0.769p
```

```
+Cgs=0.769p
```

```
+FC=0.5
```

```
+PB=.8
```

```
+VtoTC=-1e-9
```

```
+betaTCE=-1e-9
```

```
*
```

```
.model JP50_6u PJF
```

```
+Vto={-1.029*VTOP}
```

```
+beta={bPL*0.316}
```

```
+lambda=0.022
```

```
+Is=0.36E-16
```

```
+Rd=77
```

```
+Rs=77
```

```
+Cgd=0.769p
```

```
+Cgs=0.769p
```

```
+FC=0.5
```

```
+PB=.8
```

```
+VtoTC=-1e-9
```

```
+betaTCE=-1e-9
```

```
*
```

Возможность учета влияния низких температур и потока нейтронов, совпадение результатов моделирования и измерений ВАХ при различных температурах и токах стока иллюстрируют рис. 24-33.

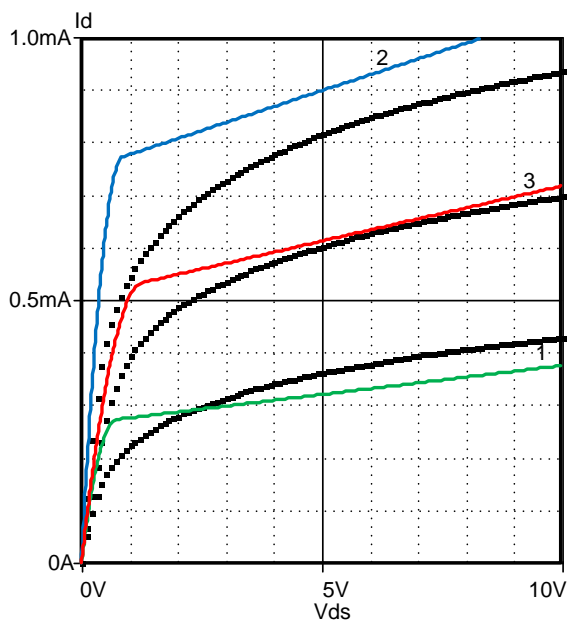


Рис. 24. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{DS} для JN260_6 при разных температурах: 1 - минус 197°C; 2 - минус 120°C; 3 - 30°C

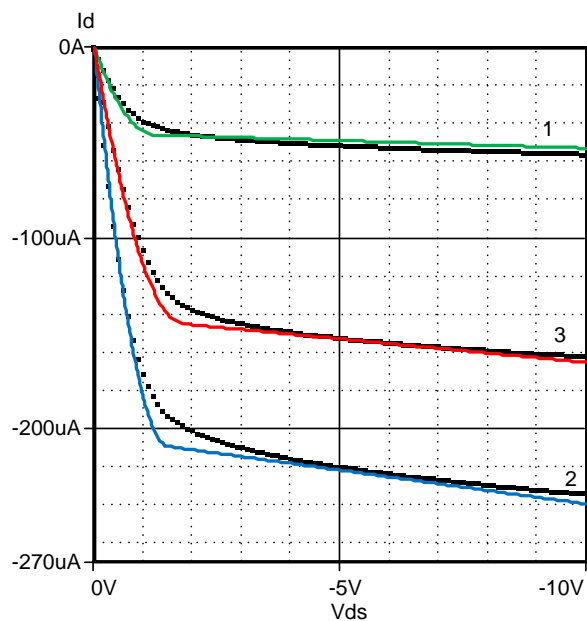


Рис. 25. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{DS} для JP50_6 при разных температурах: 1 - минус 197°C; 2 - минус 120°C; 3 - 30°C

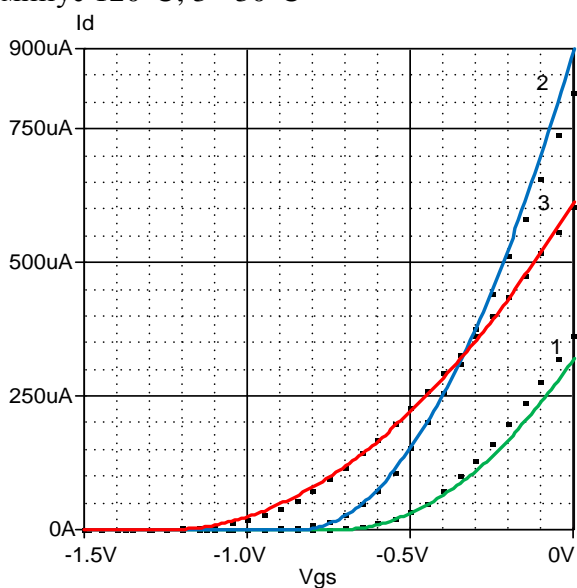


Рис. 26. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для JN260_6 при разных температурах: 1 - минус 197°C; 2 - минус 120°C; 3 - 30°C

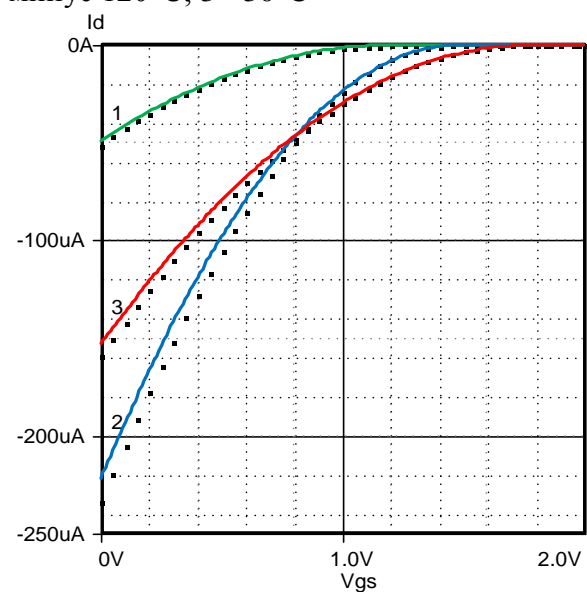


Рис. 27. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для JP50_6 при разных температурах: 1 - минус 197°C; 2 - минус 120°C; 3 - 30°C

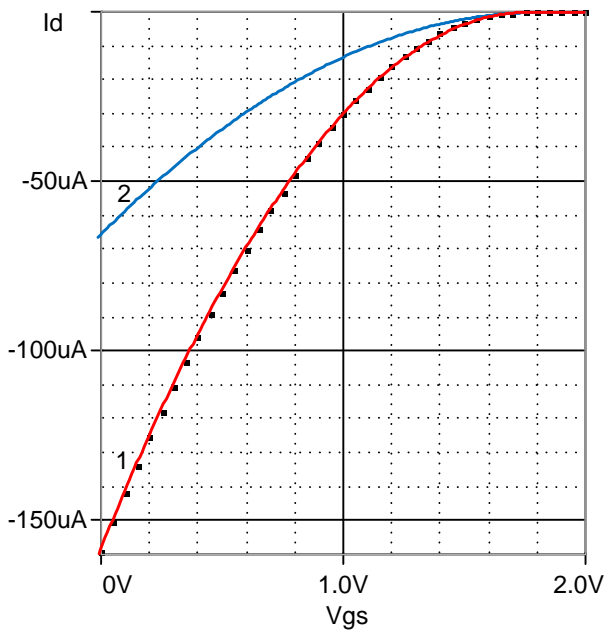


Рис. 28. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для p-JFET при $T=30^\circ\text{C}$: 1 – JP50_6; 2- JP50_6u

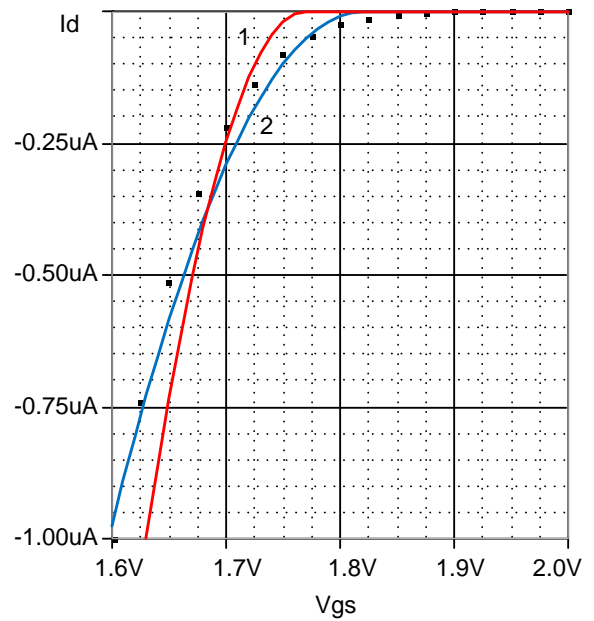


Рис. 29. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для p-JFET при $T=30^\circ\text{C}$: 1 – JP50_6; 2- JP50_6u

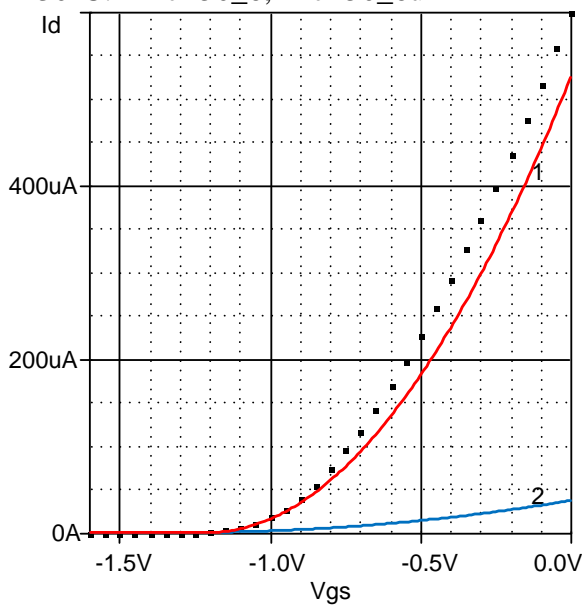


Рис. 30. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для n-JFET при $T=30^\circ\text{C}$: 1 – JN260_6; 2 – JN260_6u

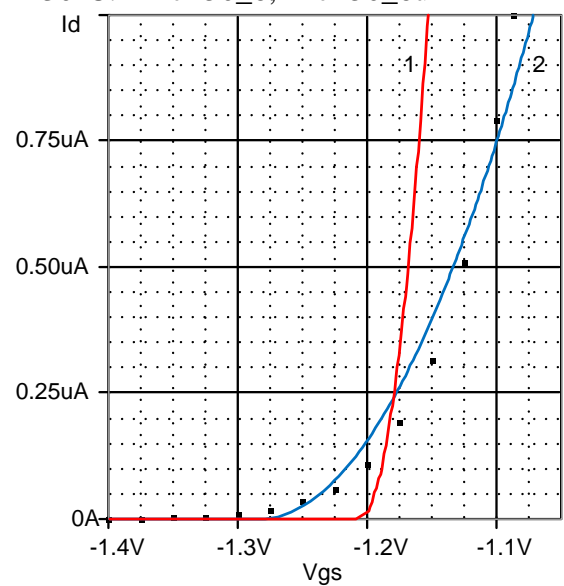


Рис. 31. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для n-JFET при $T=30^\circ\text{C}$: 1 – JN260_6; 2 – JN260_6u

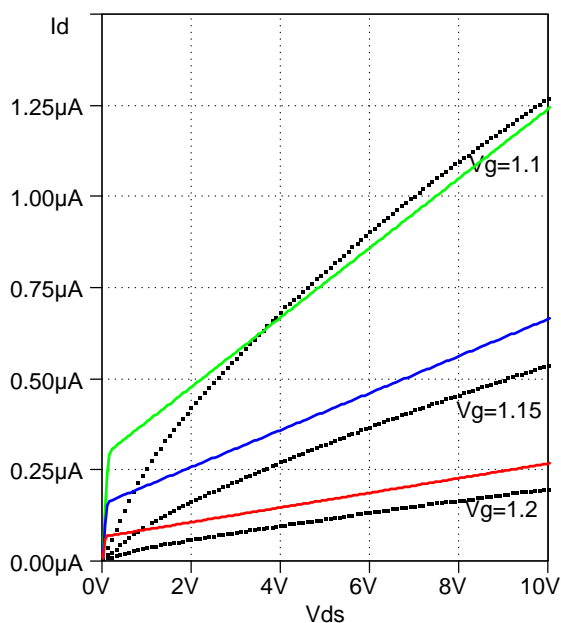


Рис. 32. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{DS} для JN260_6u при $T=30^\circ\text{C}$

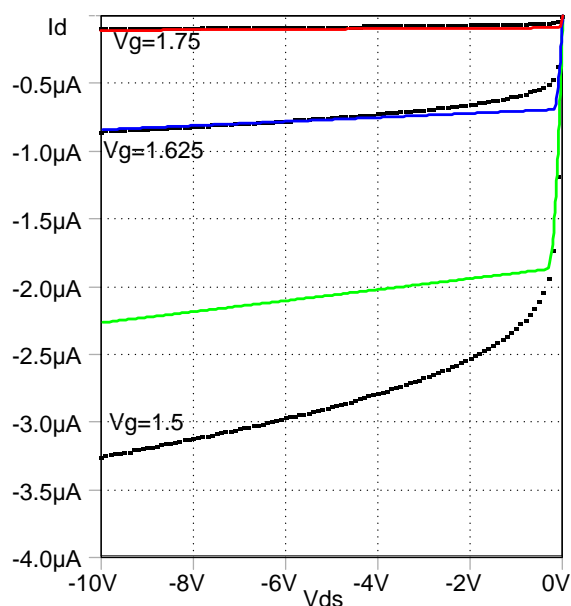


Рис. 33. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{DS} для JP50_6u при $T=30^\circ\text{C}$

3. Заключение

В обзоре рассмотрены результаты работ по созданию для САПР LTspice средств моделирования влияния ПР и низких температур на статические параметры аналоговых биполярно-полевых микросхем, а именно: методики проведения измерений радиационных и температурных изменений ВАХ транзисторов, 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 ВЛТ 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.

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

Литература

1. 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 / O.V. Dvornikov, V.L. Dziatlau, N.N. Prokopenko, K.O. Petrosiants, N.V. Kozhukhov, V.A.

Tchekhovski // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998507.

2. 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 / O. V. Dvornikov, V. L. Dziatlau, V. A. Tchekhovski, N. N. Prokopenko and A. V. Bugakova // 2018 14TH International Scientific technical Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894. Proceedings, Novosibirsk, Russia, October 2-6, 2018. Pp. 200-207DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545562.

3. О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский. Изменение параметров комплементарных 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. O.V. Dvornikov, V.A. Tchekhovski, V.L. Dziatlau, N.N. Prokopenko. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. RussianMicroelectronics. – 2016. -Vol. 45, No. 1. - P. 54-62. DOI: 10.1134/S10 63739716010030.

5. Modernization of Low-Temperature JFET Models Built into LTspice CAD Systems, Taking into Account the Results of their Experimental Study / O. Dvornikov, V. Dziatlau, V. Tchekhovski, N. Prokopenko, A. Zhuk, A. Bugakova // Latin American Electron Devices Conference (LAEDC-2020), San José, Costa Rica, February 25 - 28, 2020.

6. Radiatsionnyitsentr 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'nym nauchnym oborudovaniem i priborami. 4-ivypusk. Minsk, SO «BELISA», 2008. pp. 40-41.

7. Software and hardware complex for studying semiconductor devices at low, incl. cryogenic, temperatures / DvornikovO.V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. //Ural Conference on Measurements (UralCon), 2017 2nd International. DOI:10.1109/URALCON.2017.8120719.

8. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 2. Идентификация параметров модели, описывающих вольтамперные характеристики биполярных транзисторов / О. Дворников, Ю. Шульгевич // Современная электроника. – 2009. – № 6. – С. 52–61.

9. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 4. Идентификация параметров модели Шихмана- Ходжеса полевого транзисторов с р-п-переходом/ О. Дворников, Ю. Шульгевич // Современная электроника. – 2009. – № 8. – С. 50–57.

10. <http://mnipi.by/articles/kontrol-elektricheskikh-parametrov-elektronnyh-komponentov.html>

11. Дворников, О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в “Spice-подобных” программах / О.В. Дворников, В.Н. Гришков // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 301-306.

12. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1. Расчет «Spice-параметров» биполярных транзисторов с использованием конструктивно-технологических и электрофизических параметров / О. Дворников, Ю. Шульгевич // Современная электроника. – 2009. – № 5. – С. 48–53.

13 Изучение вольтамперных характеристик комплементарных JFET в широком диапазоне токов стока / О. В. Дворников, В. Л. Дятлов, В. А. Чеховский, Н. Н. Прокопенко, А. В. Бугакова. - в печати.

14. Прогнозирование стойкости биполярных микросхем к различным видам проникающих излучений/ Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В.,

Ластовский С.Б. // Материалы 23-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 8-13 сент. 2013 г.). Т. 2. С. 925-927.

15. BiJFet Array Chip MH2XA030 — a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits / O. V. Dvornikov, V. L. Dziatlau, V. A. Tchekhovski, N. N. Prokopenko and A. V. Bugakova // 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), October 22-23, 2018, Saint Petersburg, Russia DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415, WOS:000454986000003.

16. Influence of Penetrating Radiation on Current-Voltage Characteristics of Complementary JFETs / Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. // 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), October 17-18, 2019, Saint Petersburg, Russia, pp. 1-4 DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906794.

17. Модели CJFET транзисторов при воздействии низких температур и проникающей радиации / Дворников О.В. // Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН - 2019. - 2 с. Режим доступа: <http://www.ippm.ru/data/eljrnal/paper/J41.pdf>.