



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

О.В. Дворников¹, В.А. Чеховский², Н.Н. Прокопенко³, Я.Д. Галкин⁴, А.В. Кунц⁴

¹ ОАО "Минский научно-исследовательский приборостроительный институт", г. Минск

² "Институт ядерных проблем" Белорусского государственного университета, г. Минск

³ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

⁴ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск



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

O.V. Dvornikov¹, V.A. Tchekhovski², N.N. Prokopenko³, Ya.D. Galkin⁴, A.V. Kunts⁴

¹ОАО "Minsk Scientific and Research Instrument-Making Institute", Minsk

²"Research Institute for Nuclear Problems" of Belarusian State University, Minsk

³"Don State Technical University", Rostov-on-Don, prokopenko@sssu.ru

⁴ "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk

АННОТАЦИЯ ДОКЛАДА

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.

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 [1-4].

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 [5-8].

ЦЕЛЬ ДОКЛАДА

Целью настоящего доклада 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).

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.

А. ВЫБОР САПР И "SPICE-МОДЕЛЕЙ" [9, 10]

При схемотехническом моделировании ИС применяют разнообразные коммерческие САПР со встроенными моделями ВТ (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 ВТ 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".

А. ВЫБОР САПР И "SPICE-МОДЕЛЕЙ" [9, 10]

Анализ известных методов модификации "Spice-моделей" [7, 11-13] для описания влияния ПР выявил, что для одновременного учета влияния радиации и низких температур в BJT 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°C до 30°C .

В. ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВАХ [14,15]

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» [16]. 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 [17].

В. ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВАХ [14,15]

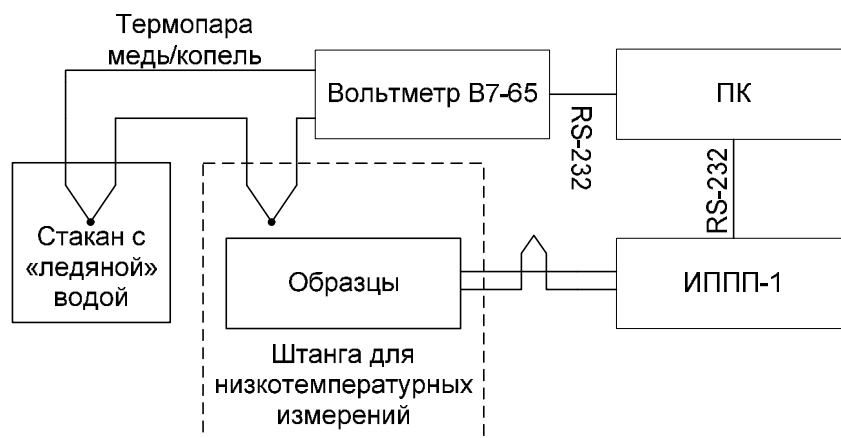


<http://www.scienceportal.org.by/upload/CKP2008.pdf>

В. ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВАХ [14,15]



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. 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



В. ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВАХ [14,15]

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 I_D от V_{GS} при $|V_{DS}|=5$ В;
- для всех BJT были построены зависимости $\beta=I_C/I_B$ от I_E при $|V_{CB}|=3$ В;
- визуально определялся "типичный" образец, ВАХ которого наиболее близка к средней;
- для "типичного" образца JFET выполнялась идентификация параметров модели VTO, BETA, LAMBDA в области насыщения ВАХ, были построены зависимости \dot{Q}_D от V_{GS} , нормированная выходная характеристика I_D/I_{D10V} от V_{DS} , установлена область адекватности моделей, при необходимости идентифицированы 2 набора параметров для разных диапазонов токов стока;
- для BJT идентифицировался параметр модели VAF (напряжение Эрли), измерялась зависимость V_{BE} от I_E , для "типичного" BJT была построена нормированная выходная характеристика I_C/I_{C1V} от V_{CE} при $I_B=\text{const}$, $|V_{CE}|=1$ В

С. ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ [13]

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 BJT и JFET, и упростить схемотехническое моделирование аналоговых микросхем в жестких условиях эксплуатации.

С. ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ [13]

На статические характеристики ВТ и JFET наиболее существенно влияют следующие изменяющиеся при радиационном облучении параметры модели [9, 13]: BF, VAF, IKF, IS, ISE, RC, RE, RB, BETA, VTO, LAMBDA, RD, RS. Взаимосвязь этих "Spice- параметров" с параметрами полупроводника и ПР описывается приблизительными математическими выражениями [9]:

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

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

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

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

$$ISE \sim \frac{qA_E}{e} S_E + v_S S_{SURF} \frac{n_I}{N_{AB}} \quad (5)$$

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

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

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

С. ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ [13]

$$\text{LAMBDA} \sim N_{\text{CH}}^{-0,5}, \text{RD} \sim N_{\text{D}}^{-1}, \text{RS} \sim N_{\text{S}}^{-1}, \quad (9)$$

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

$$\frac{n_{\text{F}}}{n_0} = \exp(-K_{\text{N}}F), \quad (10)$$

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

где $N_{\text{DE}}, N_{\text{DC}}, N_{\text{AB}}, N_{\text{CH}}, N_{\text{D}}, N_{\text{S}}$ – 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; t – 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; $m_{\text{NB}}, m_{\text{CH}}$ – подвижность электронов в базе n-p-n ВJT, основных носителей заряда в канале JFET; $K_{\text{N}}, K_{\text{m}}$ – коэффициенты радиационного изменения концентрации и подвижности основных носителей заряда [18]; F – флюенс частиц (подстрочный символ « E » относится к электронам, « p » - протонам, « G » - гамма- квантам, « N » - нейтроны); c, g - эмпирические коэффициенты, зависящие от вида частиц и их энергии, типа проводимости полупроводника.

С. ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ [13]

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

* Оценка относительного изменения концентрации

* в областях эмиттера (em), базы (pb), коллектора (epi)

```
.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*Meri*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}
```


С. ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ [13]

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

Таблица 1

Эмпирическая зависимость скорости поверхностной рекомбинации от поглощенной дозы облучения D_G [19]

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 ВТ и JFET, без дополнительных радиационных исследований за счет изменения исходных данных, характеризующих типовую структуру.

D. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ "SPICE-ПАРАМЕТРОВ" [9, 15]

Типовая модель Шихмана-Ходжеса JFET не описывает немонотонное изменение его характеристик при низких температурах [20], а именно увеличение максимального тока стока $I_{D\text{MAX}}$ ($I_{D\text{MAX}}=I_D$ при $V_{GS}=0$, $V_{DS}=V_{TH}$) и крутизны при уменьшении температуры ориентировочно до -100°C ... -130°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.

D. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ "SPICE-ПАРАМЕТРОВ" [9, 15]

Для транзисторов базового матричного кристалла (БМК) АБМК-1.3 аппроксимация $\text{BETA}=f(T)$ получена в виде (здесь и далее T – температура в градусах Цельсия)

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

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

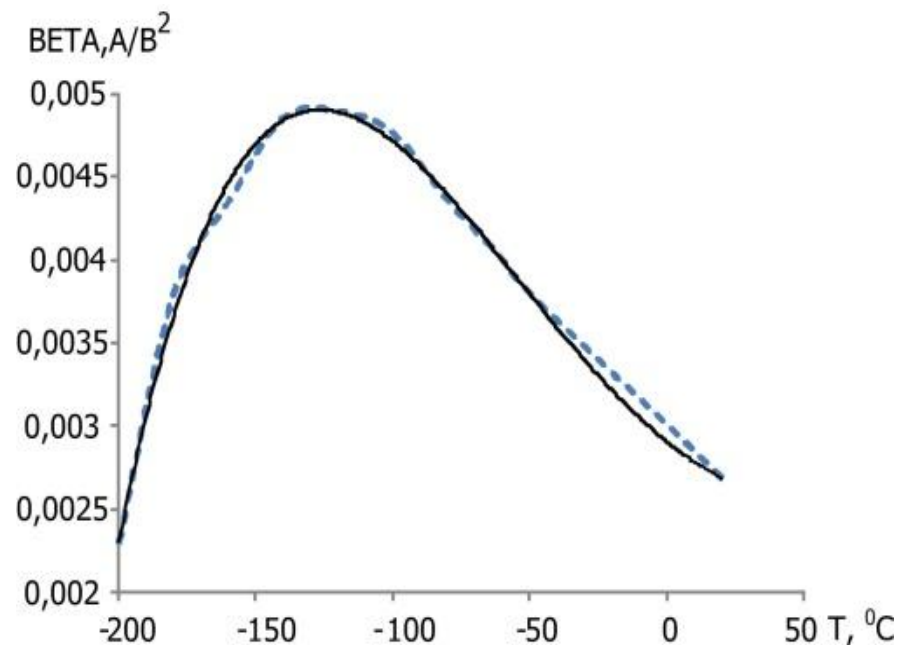


Рис. 1. Зависимость измеренного параметра BETA (пунктирная линия) и рассчитанного по выражению (13) (сплошная линия) от температуры для транзисторов АБМК-1.3

D. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ "SPICE-ПАРАМЕТРОВ" [9, 15]

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}.
```

D. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ "SPICE-ПАРАМЕТРОВ" [9, 15]

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.

D. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ "SPICE-ПАРАМЕТРОВ" [9, 15]

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

- зарегистрированы радиационные и температурные изменения максимального тока стока $I_{D\text{MAX}}$, 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.**

D. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ "SPICE-ПАРАМЕТРОВ" [9, 15]

Установлено, что в диапазоне флюенсов «быстрых» электронов от $3 \cdot 10^{13}$ до $1 \cdot 10^{16}$ эл./см² 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

$$V_{TH} = 5,1 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,145 \cdot 10^{-3} T + 1,147. \quad (19) \quad 23$$

D. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ "SPICE-ПАРАМЕТРОВ" [9, 15]

Немонотонное температурное изменение параметра β_{ETA} , идентифицированного из передаточных ВАХ, описывается соотношениями для p-JFET

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

для n-JFET

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

Изменением напряжения Эрли (параметра λ), идентифицированного из выходных ВАХ, в диапазоне температур от -150 °C до 30 °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 BJT и JFET в типовых схемах включения () с применяемыми директивами управления.

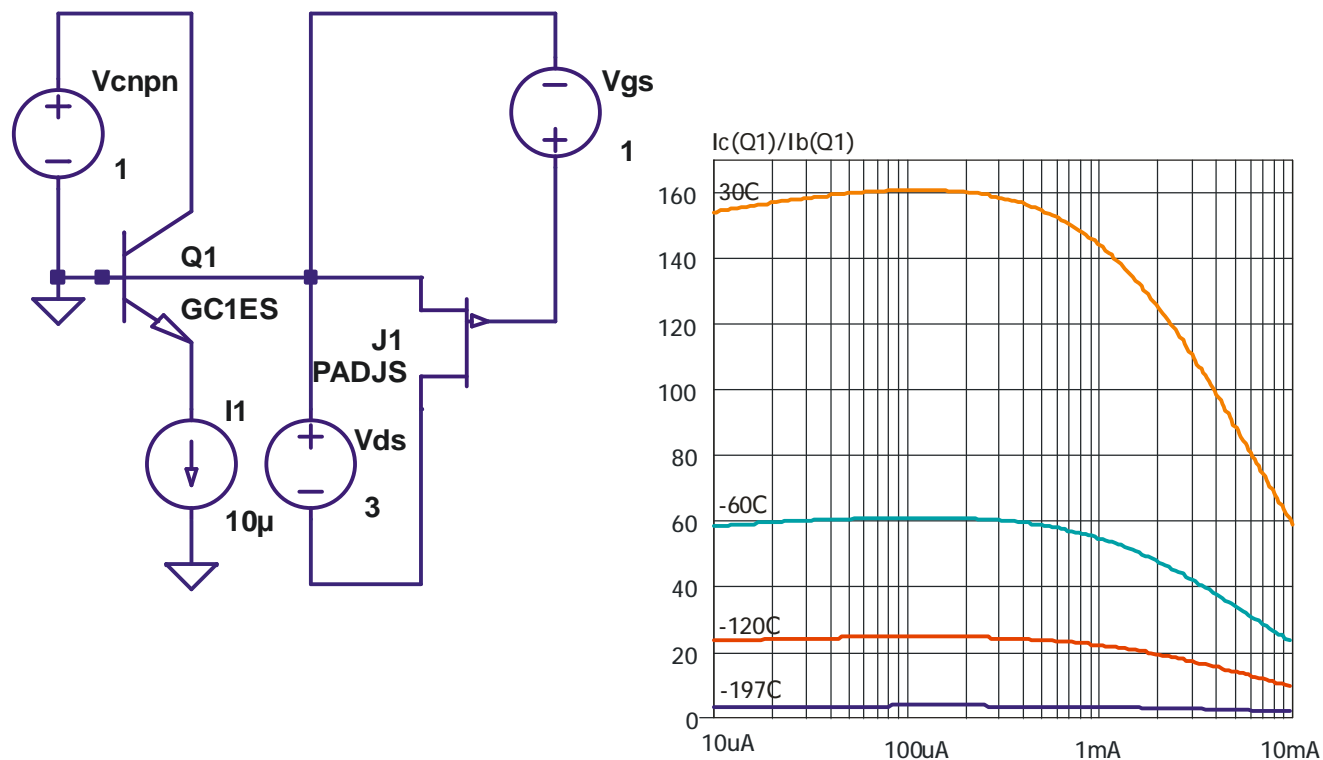


Рис. 2. Типовая схема включения BJT и JFET и результаты моделирования для n-p-n-транзистора АБМК-1.3 зависимости β от I_E при разных температурах, без воздействия ПР. Директивы управления:
.step param LT list -197 -120 -60 30
.dc dec I1 10u 10m 101 temp list {LT}
.param LT=30
.param Fn=1
.param Dg=1
.param fit=1

Е. МЕТОДИКА ОДНОВРЕМЕННОГО УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

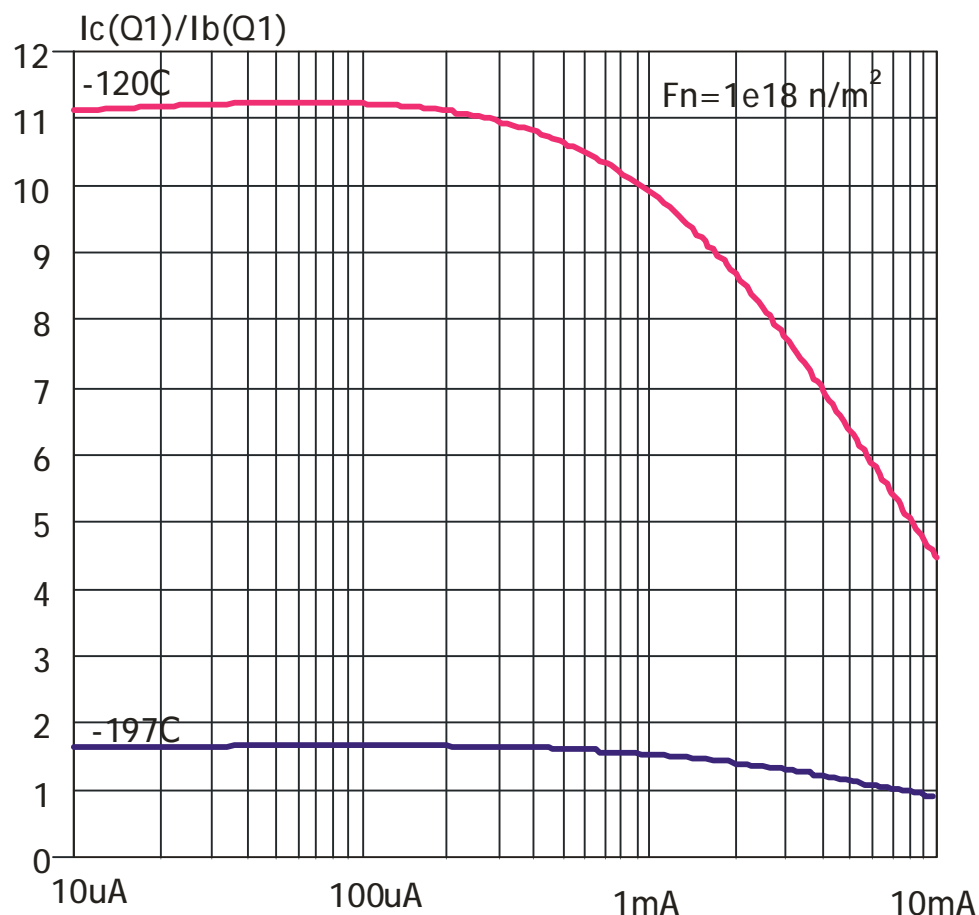


Рис. 3. Результаты моделирования для n-p-n-транзистора АБМК-1.3 зависимости β от I_E при разных температурах и воздействии флюенса нейтронов $F_N = 10^{14} \text{ н/см}^2$. Директивы управления:

```
. step param LT list -197 -120  
.dc decl1 10u 10m 101 temp list {LT}  
.param LT=30  
.param Fn=1e18  
.param Dg=1  
.param fit=1
```

Е. МЕТОДИКА ОДНОВРЕМЕННОГО УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

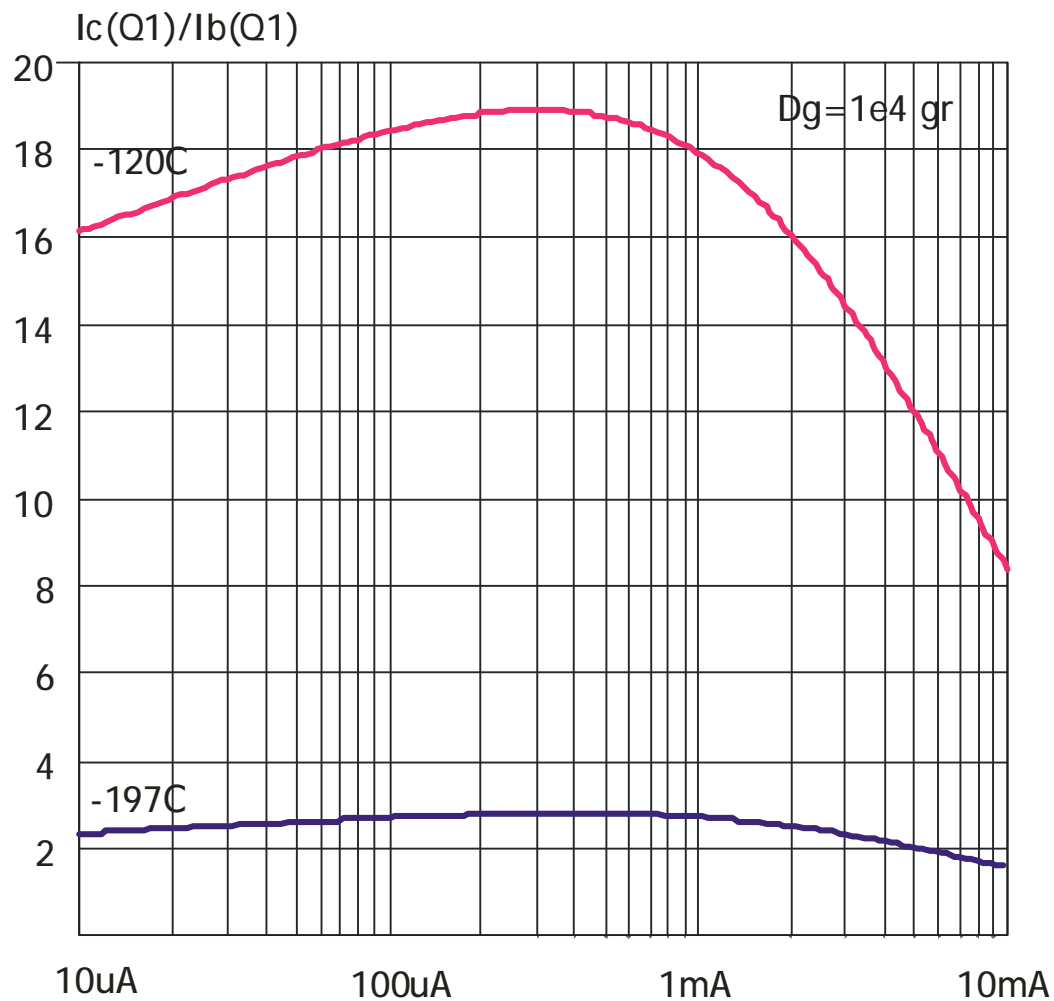


Рис. 4. Результаты моделирования для n-p-n-транзистора АБМК-1.3 зависимости β от I_E при разных температурах и поглощенной дозе гамма- облучения $D_G=1\text{Мрад}$.

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
```

Е. МЕТОДИКА ОДНОВРЕМЕННОГО УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

В подрисуночных подписях:

- LT - глобальный параметр, описывающий температуру в градусах Цельсия,

- поток нейтронов с размерностью n/m^2 устанавливался по директиве

.param Fn=значение $[n/m^2]$,

- 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).

Е. МЕТОДИКА ОДНОВРЕМЕННОГО УЧЕТА ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

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}
```

Г. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИС К РАДИАЦИОННЫМ ДЕФЕКТАМ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ "БЫСТРЫМИ" ЭЛЕКТРОНАМИ [21]

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 [22]:

$$N_{DE} = F_E v_E \sigma_{DE} n_A \rho, \quad (22) \quad N_{DP} = F_P v_P \sigma_{DP} n_A \rho, \quad (23) \quad N_{DN} = F_N v_N \sigma_{DN} n_A \rho, \quad (24)$$

где N_{DE} , N_{DP} , N_{DN} – концентрация дефектов смещения, вызванных электронами, протонами и нейтронами соответственно; n_E , n_P , n_N – среднее число смещенных атомов, создаваемых одним первично смещенным атомом, при облучении электронами, протонами и нейтронами; S_{DE} , S_{DP} , S_{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.

Г. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИС К РАДИАЦИОННЫМ ДЕФЕКТАМ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ "БЫСТРЫМИ" ЭЛЕКТРОНАМИ [21]

Экспериментальные значения коэффициентов n и S в зависимости от энергии частиц приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Среднее число смещенных атомов в зависимости от энергии частиц [22]

$E, \text{ МэВ}$	n_N	n_P	n_F
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	—

F. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИС К РАДИАЦИОННЫМ ДЕФЕКТАМ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ "БЫСТРЫМИ" ЭЛЕКТРОНАМИ [21]

Таблица 3

Сечения смещения для кремния в зависимости от энергии частиц [22]

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

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

ОПИСАНИЕ СОЗДАННЫХ БИБЛИОТЕК ПАРАМЕТРОВ [23, 24]

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".**

А. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРОВ MH2XA030_25.03.20.LIB

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

Библиотека содержит:

- модели с названием pnp, rnp, JFET малосигнальных транзисторов;
- 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;
- модель с названием DCmos паразитного диода полупроводниковой обкладки МОП-конденсатора 1,07 пФ;
- 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.

A. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРОВ MN2XA030_25.03.20.LIB

"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 н./м²). 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 F. 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

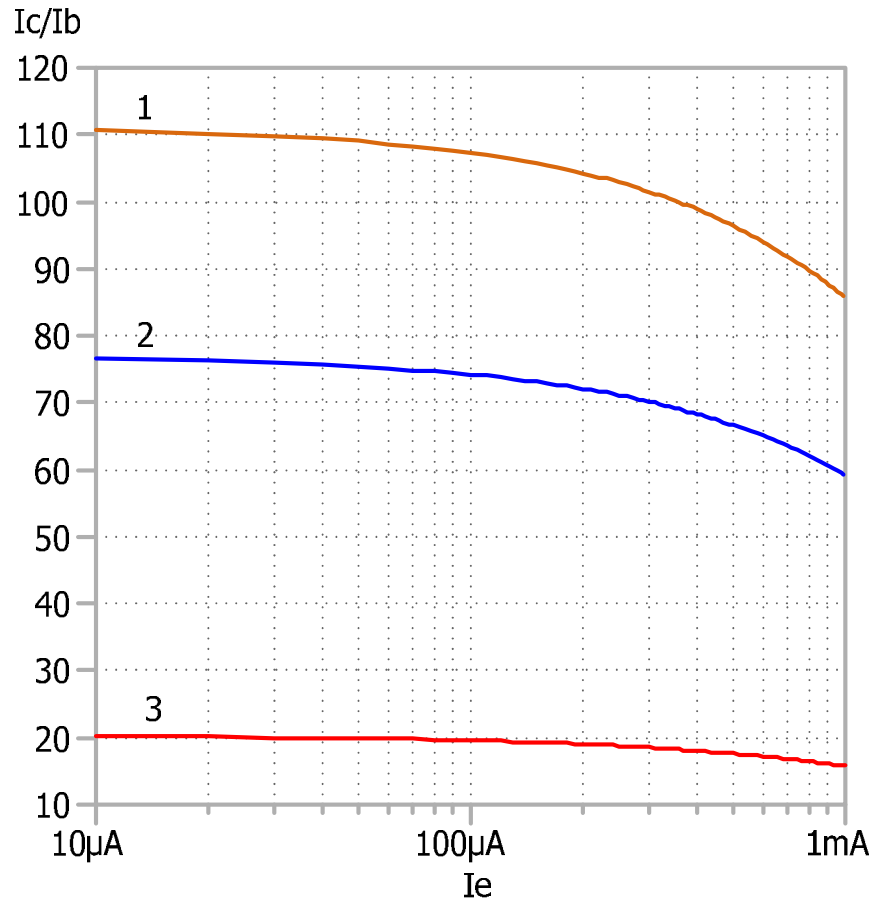
А. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРОВ MH2XA030_25.03.20.LIB

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.

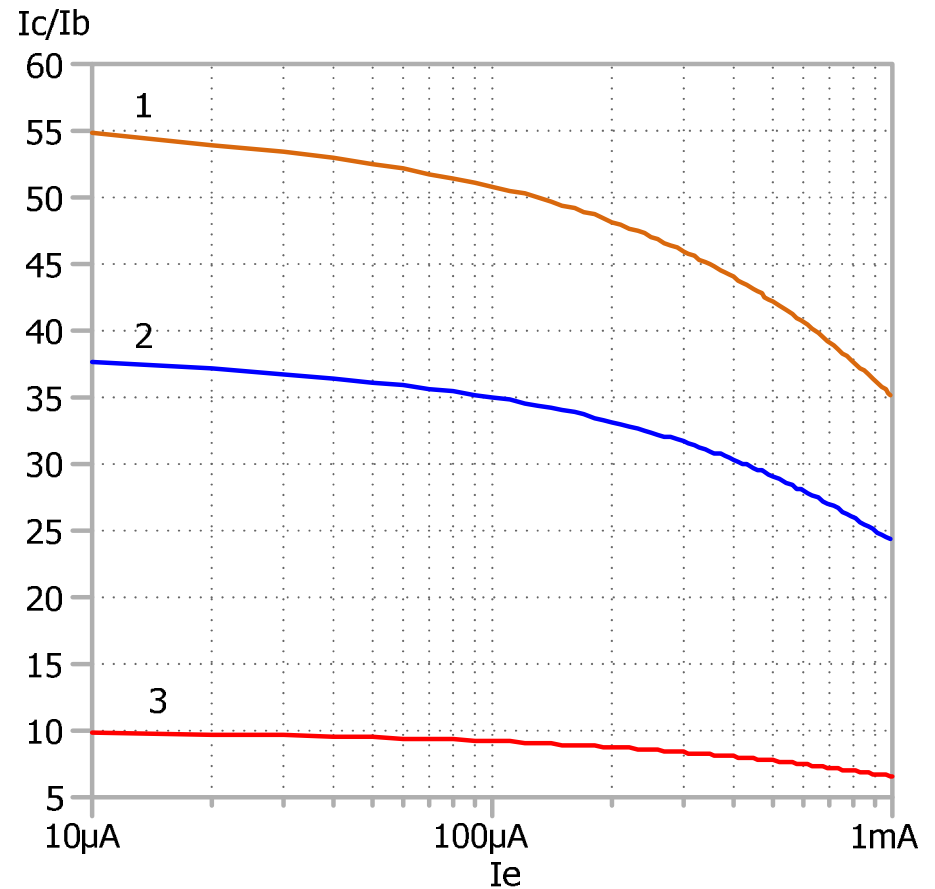
4. Технологический разброс падения напряжения на прямосмещенном эмиттерном переходе n-p-n и p-n-p-транзисторов изменением параметра NPNscale, PNPscale; разброс β - параметром BFscale; разброс ВАХ p-JFET - параметром VTOValue; разброс сопротивлений резисторов - параметрами Rpscale, Rprscale.

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

А. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРОВ MH2XA030_25.03.20.LIB



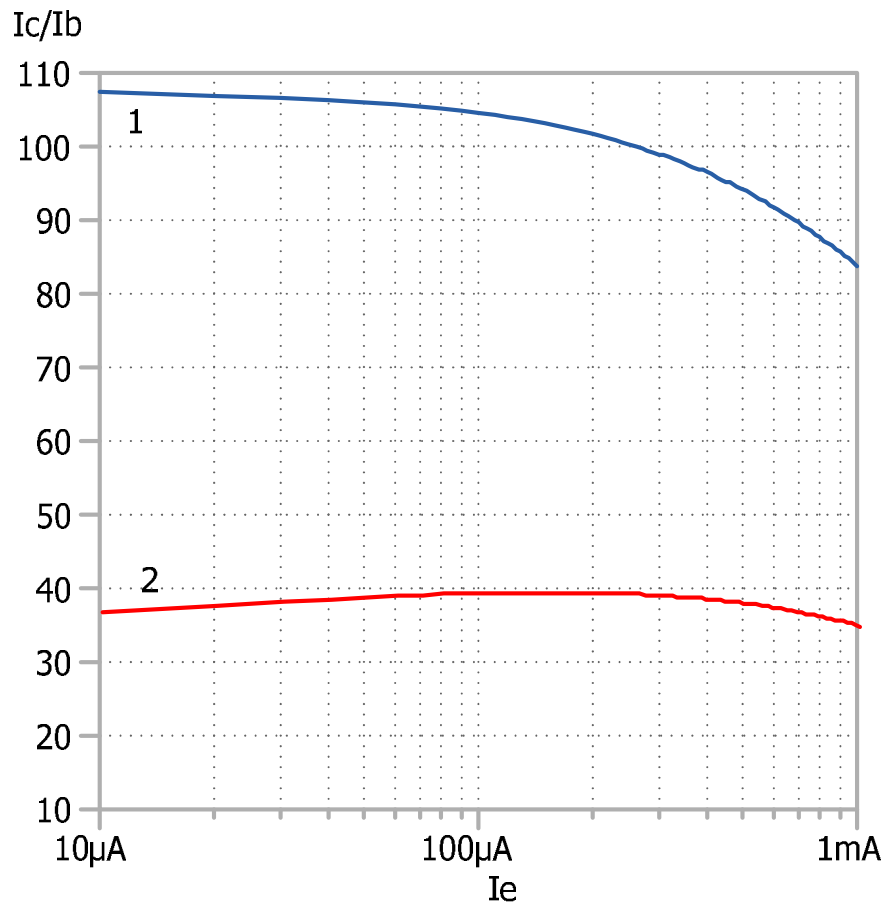
п-р-п-транзистора



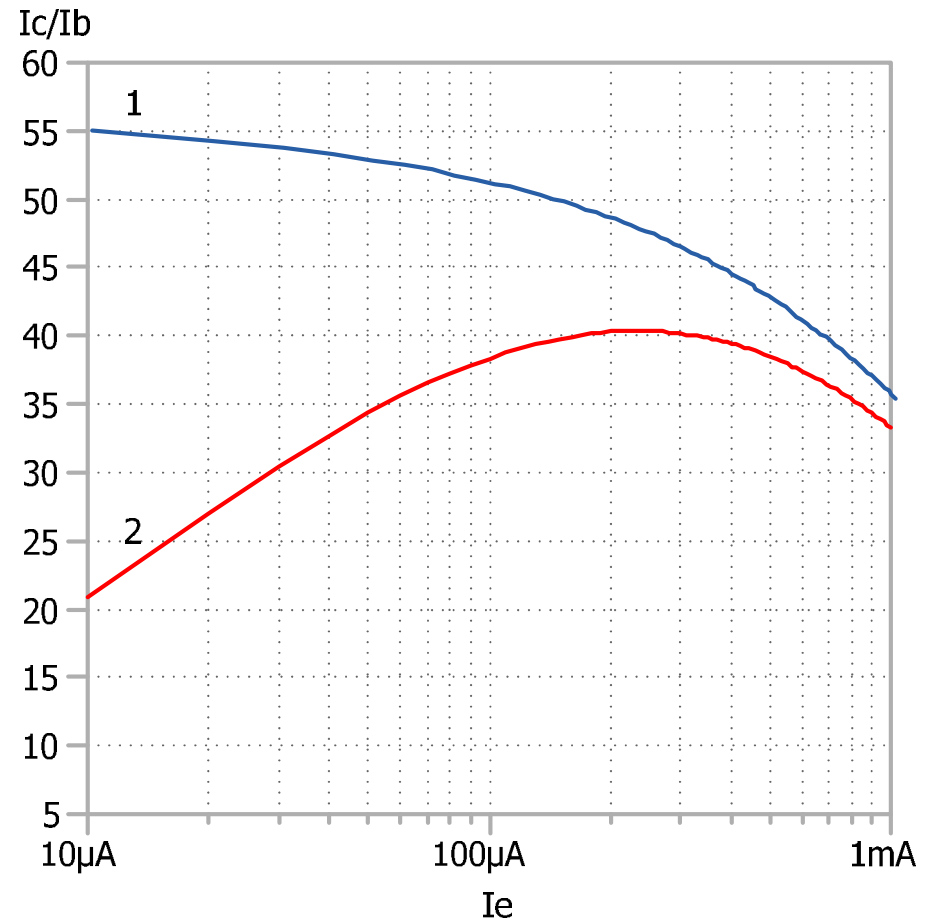
р-п-р-транзистора

Рис. 5. Результаты моделирования зависимости β от эмиттерного тока при $T = 30^\circ C$ и разных потоках нейтронов: 1 - 1 н./см^2 , 2 - 10^{13} н./см^2 , 3 - 10^{14} н./см^2

А. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРОВ MH2XA030_25.03.20.LIB



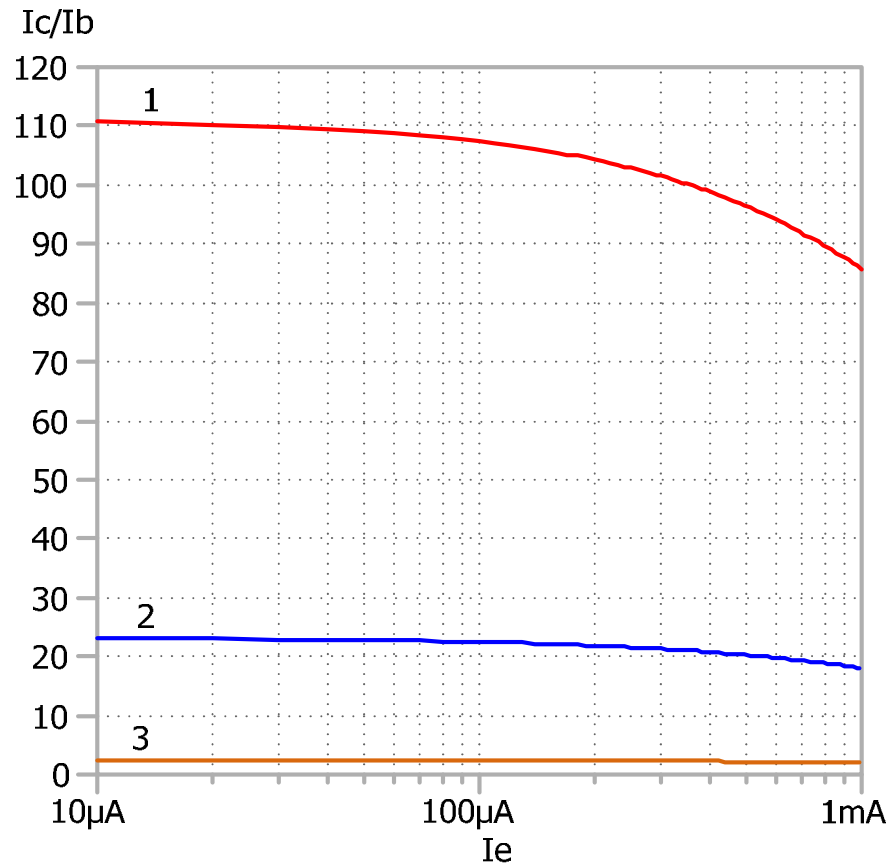
п-р-п-транзистора



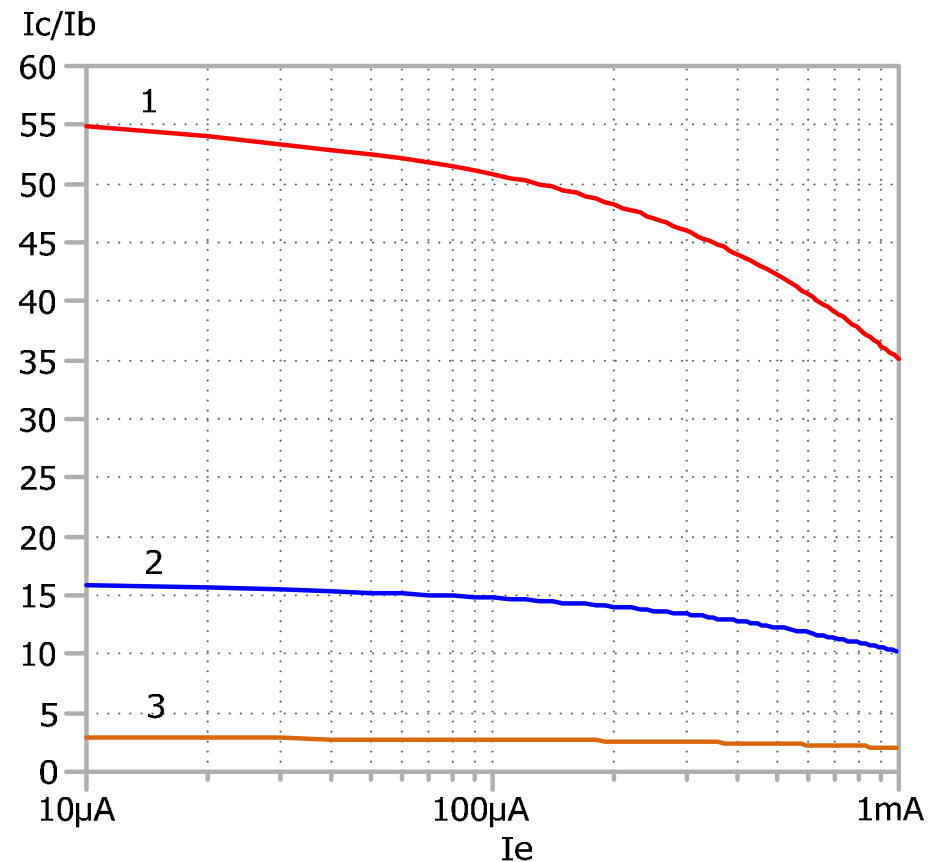
р-п-р-транзистора

Рис. 6. Результаты моделирования зависимости β от эмиттерного тока при $T = 30^\circ C$ и разных поглощенных дозах гамма-излучения: 1 - 1 рад, 2 - 3 Мрад

А. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРОВ MH2XA030_25.03.20.LIB



n-p-n-транзистора



p-n-p-транзистора

Рис. 7. Результаты моделирования зависимости β от эмиттерного тока при отсутствии влияния ПР и разных температурах: 1 - $30^\circ C$, 2 - минус $100^\circ C$, 3 - минус $197^\circ C$

А. БИБЛИОТЕКА ПАРАМЕТРОВ MH2XA030_25.03.20.LIB

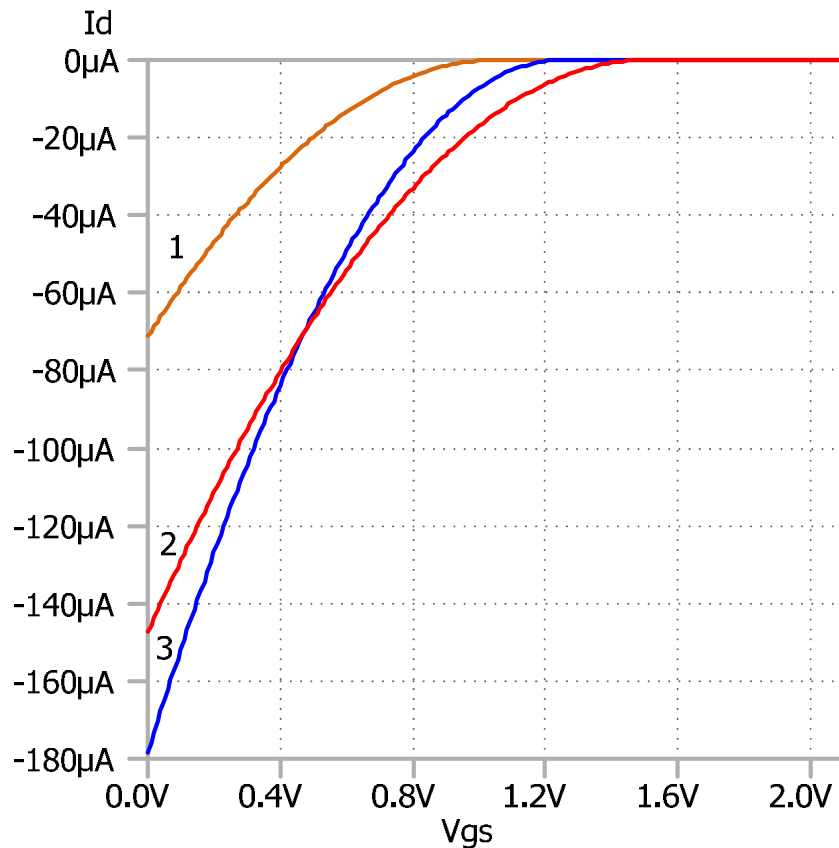


Рис.8. Результаты моделирования зависимости I_D от V_{GS} p-JFET при $V_{SD} = 3\text{ В}$ и разных температурах:

- 1 - минус 197°C ($V_{TH} = 1,04\text{ В}$),
- 2 - 30°C ($V_{TH} = 1,5\text{ В}$),
- 3 - минус 100°C ($V_{TH} = 1,24\text{ В}$)

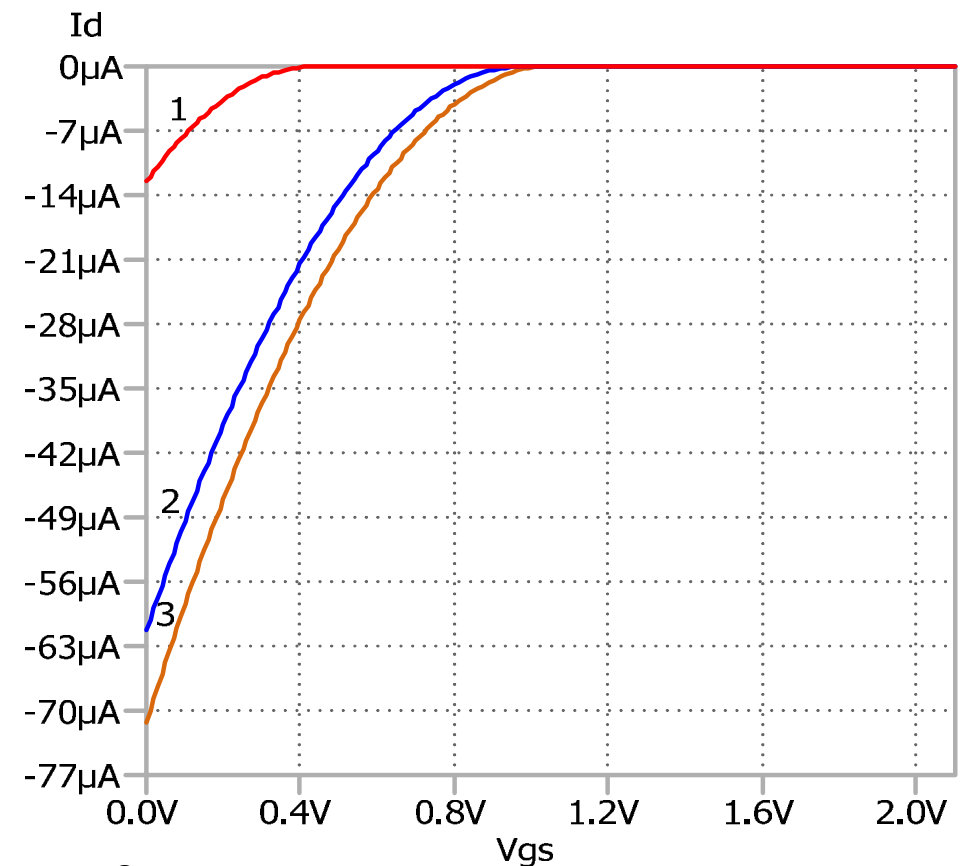


Рис. 9. Результаты моделирования зависимости I_D от V_{GS} p-JFET при минус 197°C , $V_{SD} = 3\text{ В}$ и разных потоках нейтронов:

- 1 - 10^{15} н./см^2 ($V_{TH} = 0,43\text{ В}$),
- 2 - 10^{14} н./см^2 ($V_{TH} = 0,97\text{ В}$),
- 3 - 1 н./см^2 ($V_{TH} = 1,04\text{ В}$)

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.

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB

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. 42**

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB

"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.

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°С до 30°С.

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

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

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB

Необходимость создания отдельного набора параметров для микрорежима иллюстрируют результаты измерений ВАХ на рис. 10, 11.

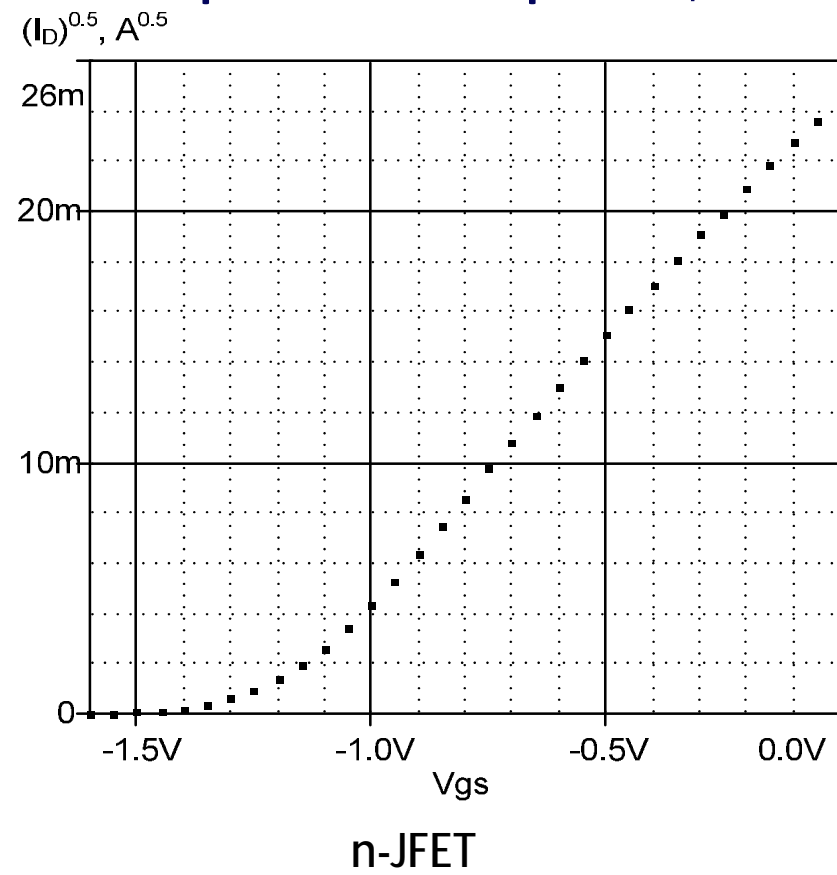
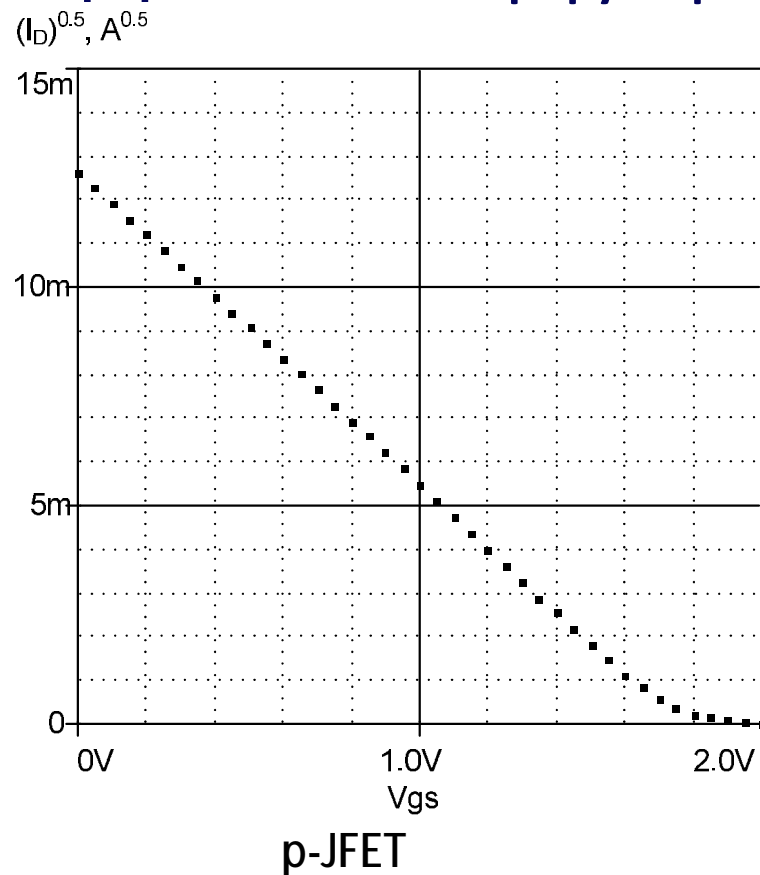
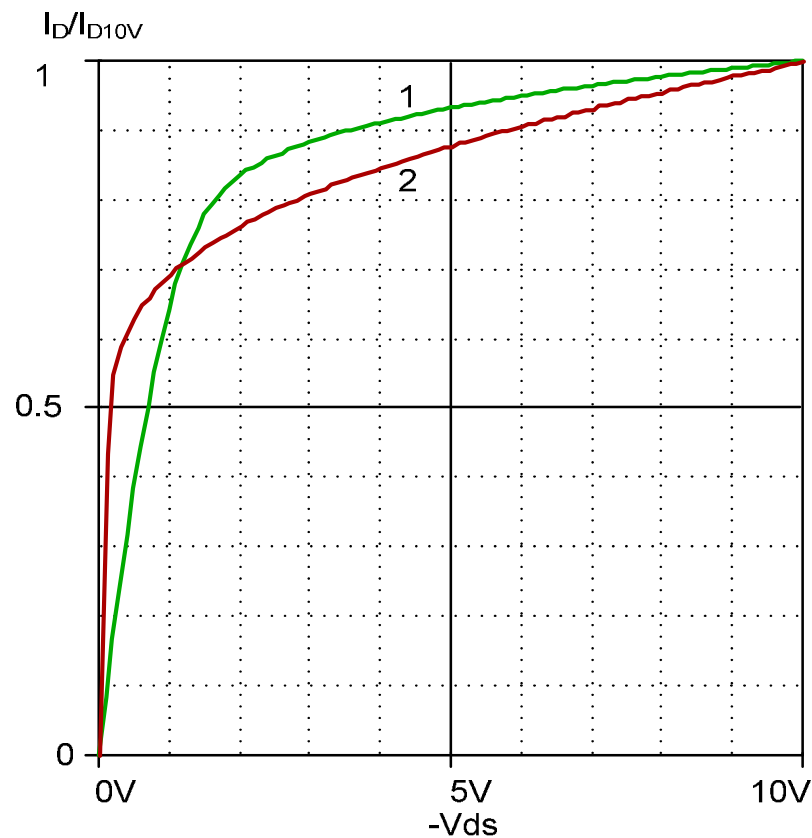
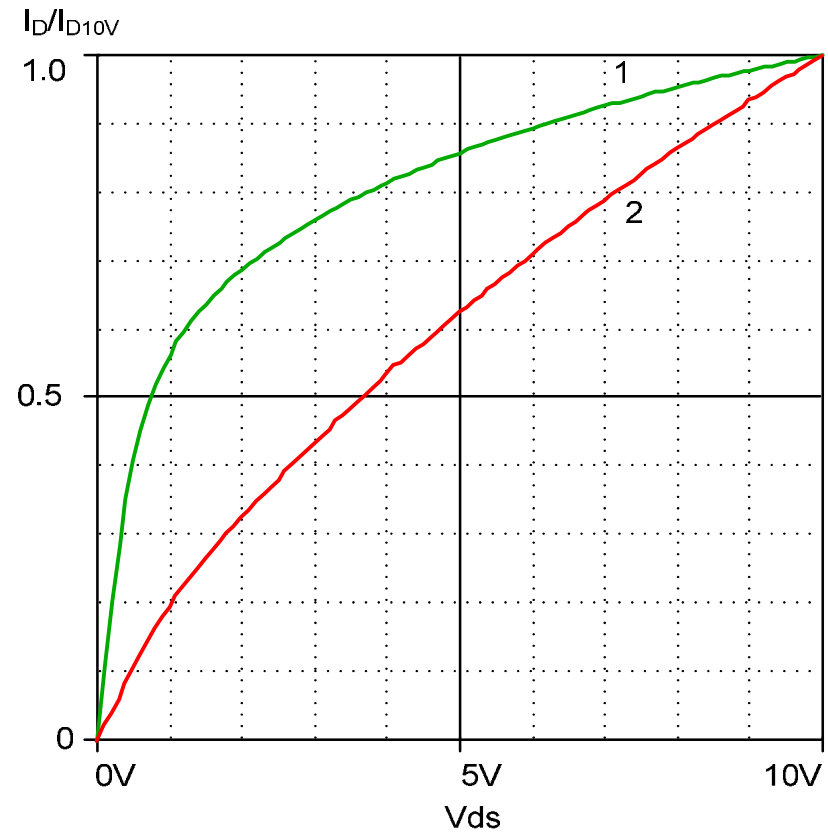


Рис. 10. Результаты измерений зависимости \ddot{O}_D от V_{GS} при $|V_{DS}|=5$ В

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB



p-JFET: 1 - $I_{D10V} = 172,25 \text{ мкА}$,
2 - $I_{D10V} = 0,856 \text{ мкА}$



n-JFET: 1 - $I_{D10V} = 570,83 \text{ мкА}$,
2 - $I_{D10V} = 1,268 \text{ мкА}$

Рис. 11. Результаты измерений зависимости нормированного тока стока I_D/I_{D10V} от V_{DS}

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB

Возможность учета низких температур, а также совпадение результатов моделирования и измерений ВАХ при различных температурах и токах стока иллюстрируют рис. 12-16.

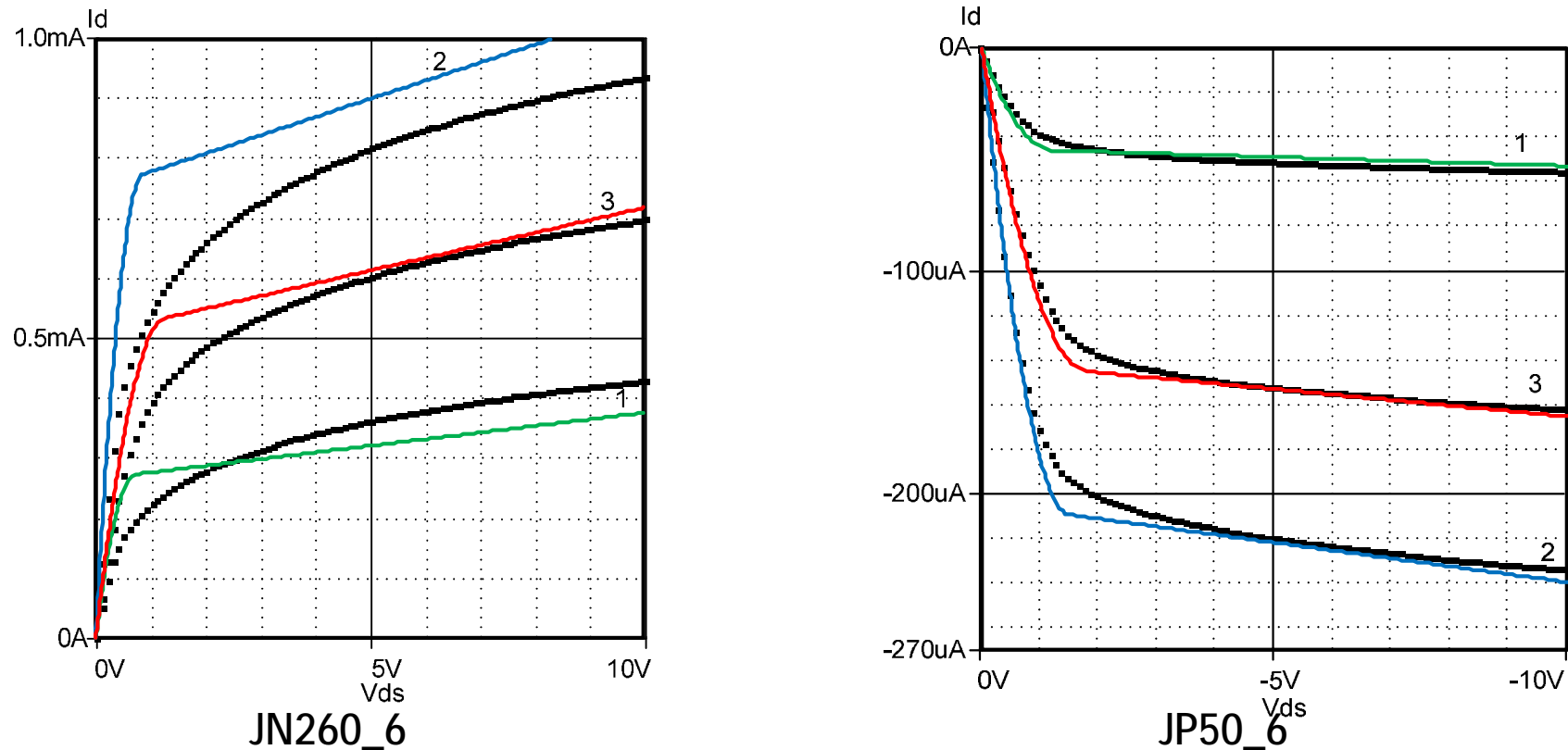
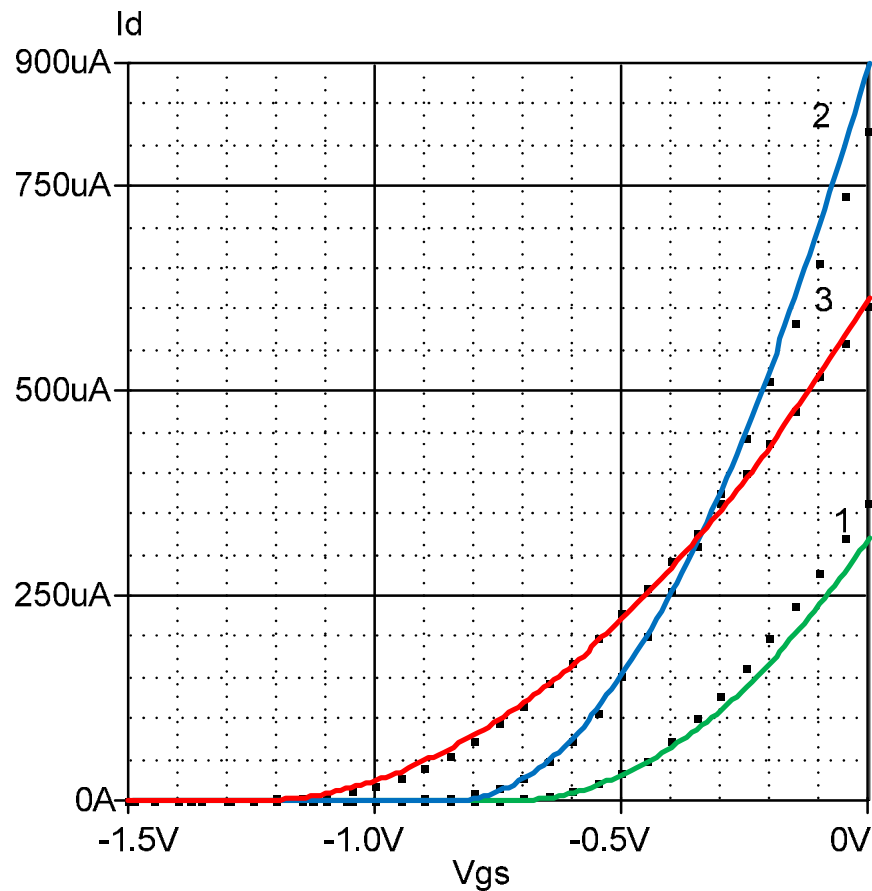
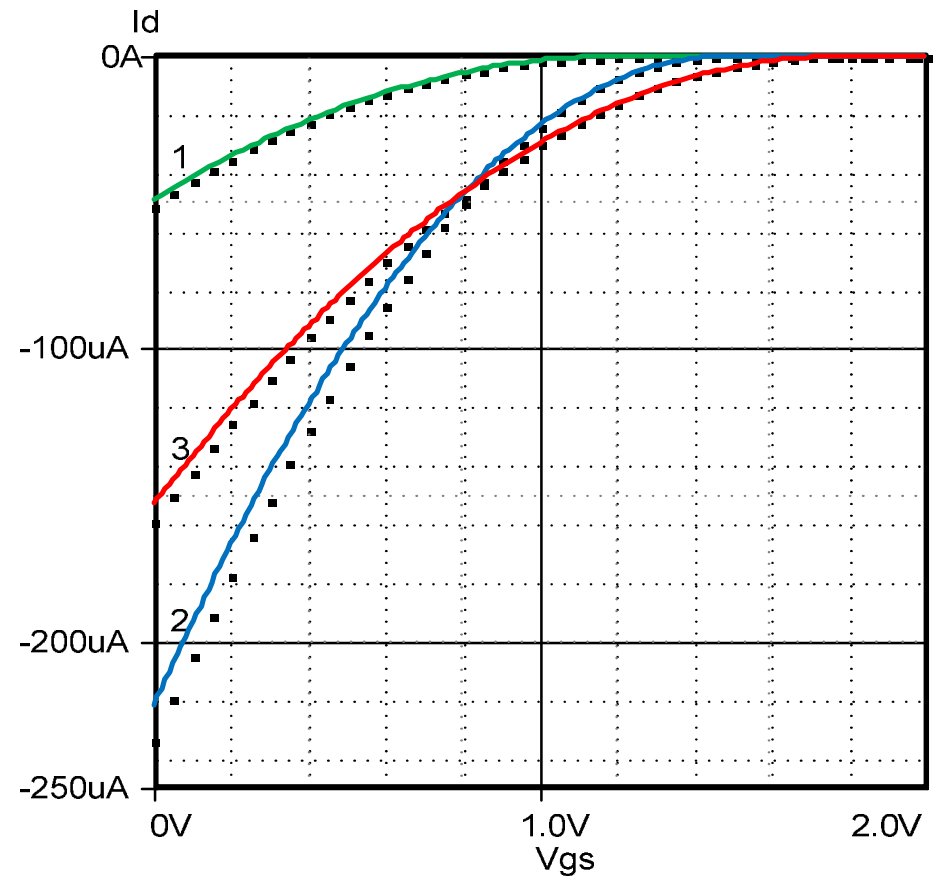


Рис. 12. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{DS} при разных температурах: 1 - минус 197°C ; 2 - минус 120°C ; 3 - 30°C 47

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB



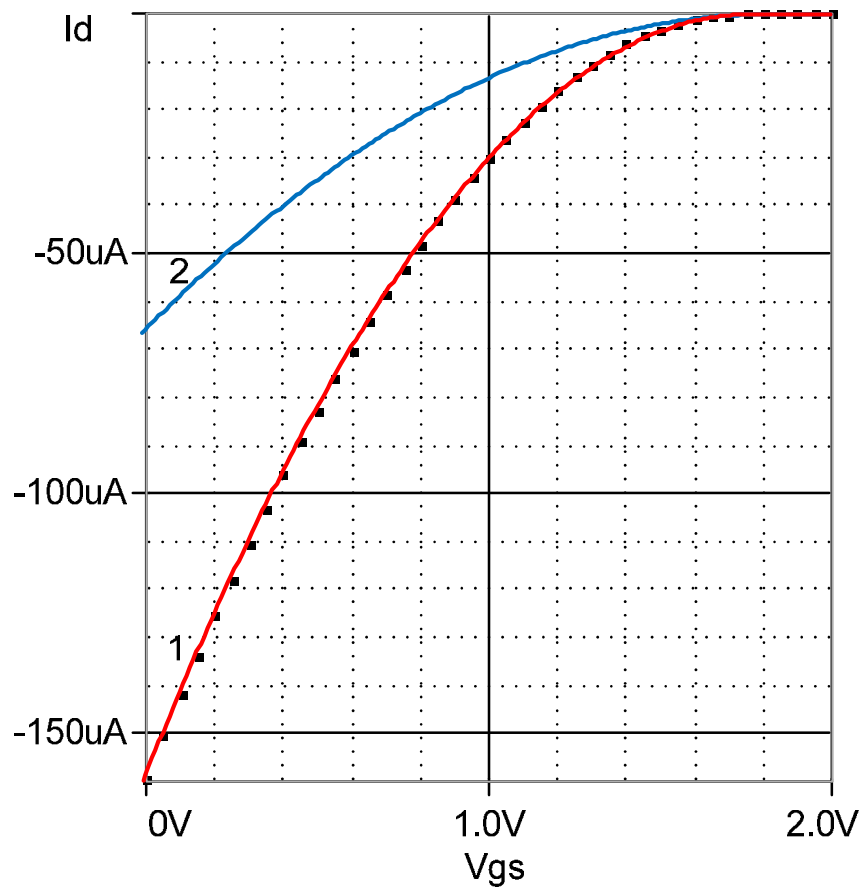
JN260_6



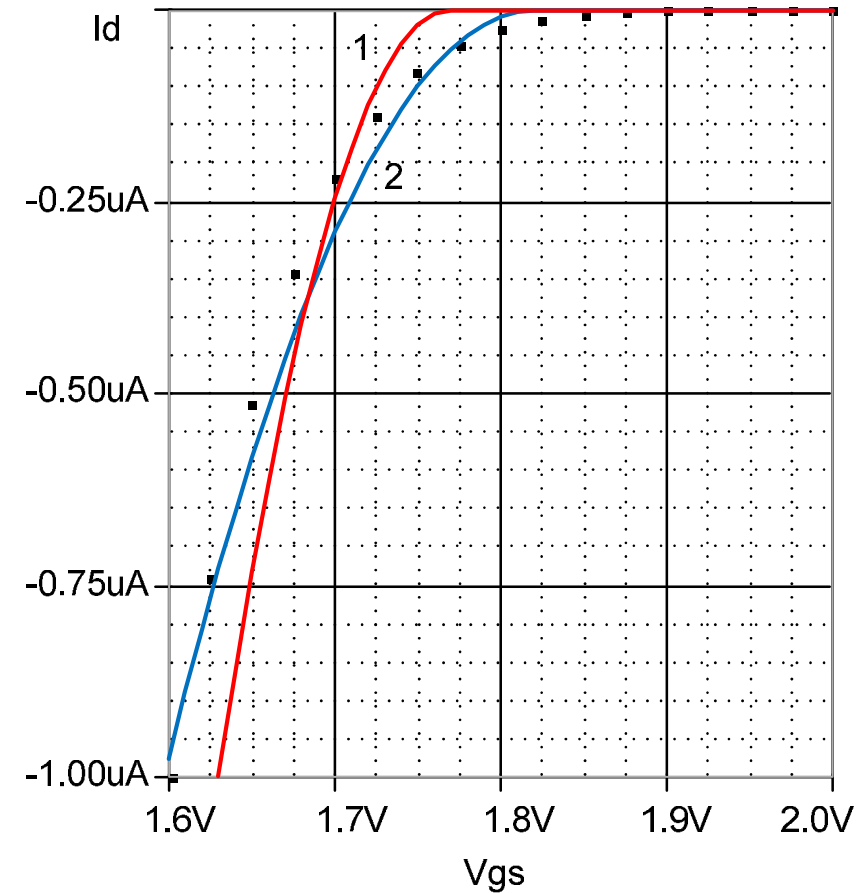
JP50_6

Рис. 13. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} при разных температурах: 1 - минус 197°C; 2 - минус 120°C; 3 - 30°C

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB



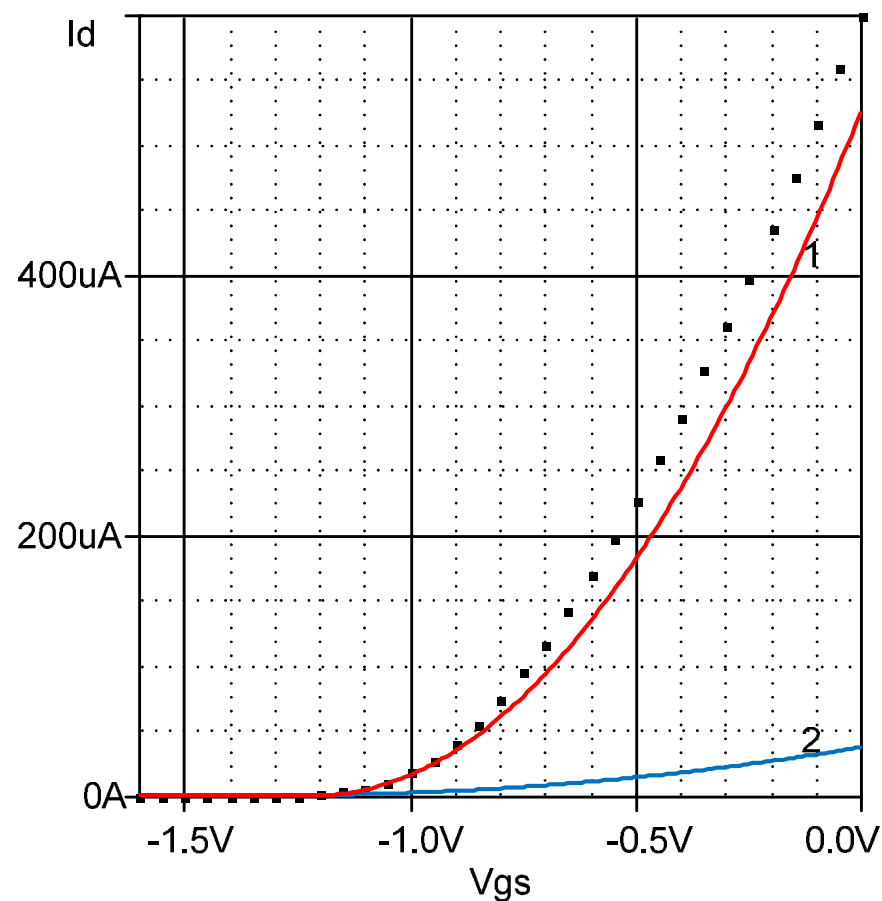
1 – JP50_6; 2- JP50_6u



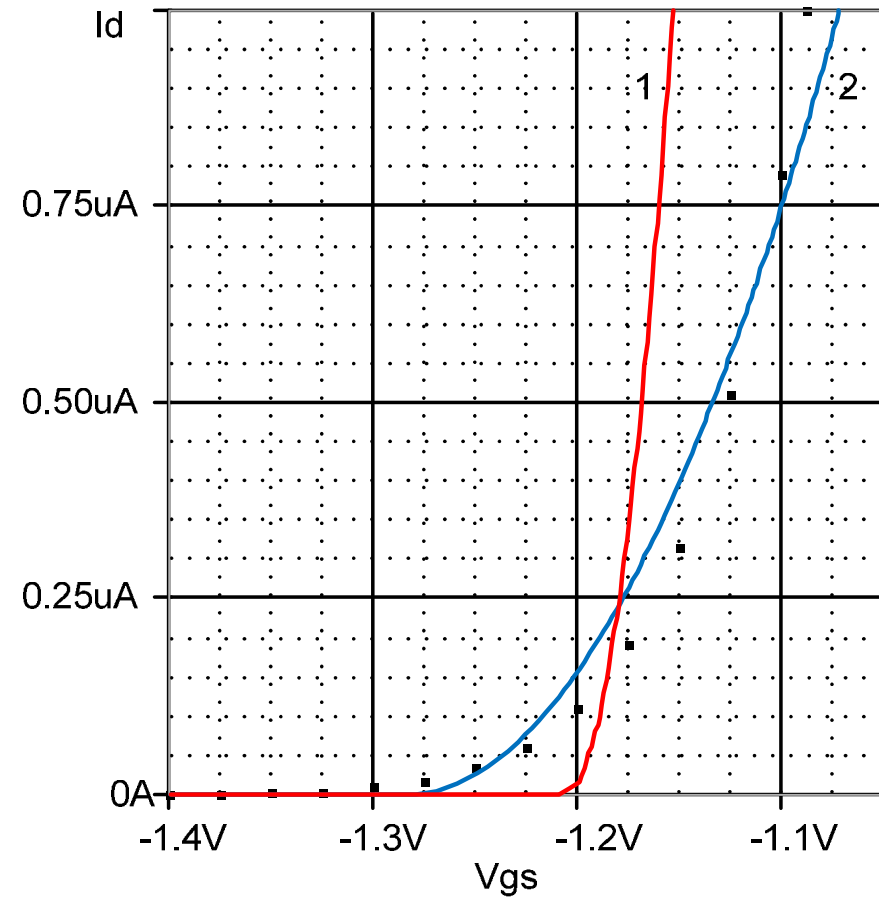
1 – JP50_6; 2- JP50_6u

Рис. 14. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для p-JFET при $T=30^\circ\text{C}$

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB



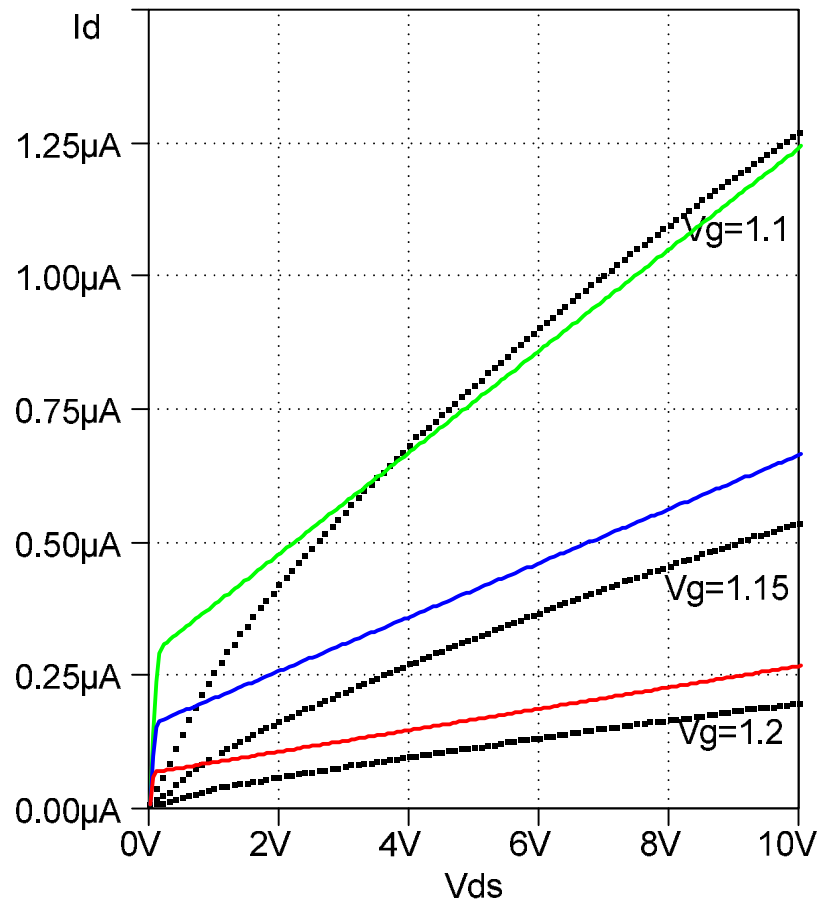
1 – JN260_6; 2 – JN260_6u



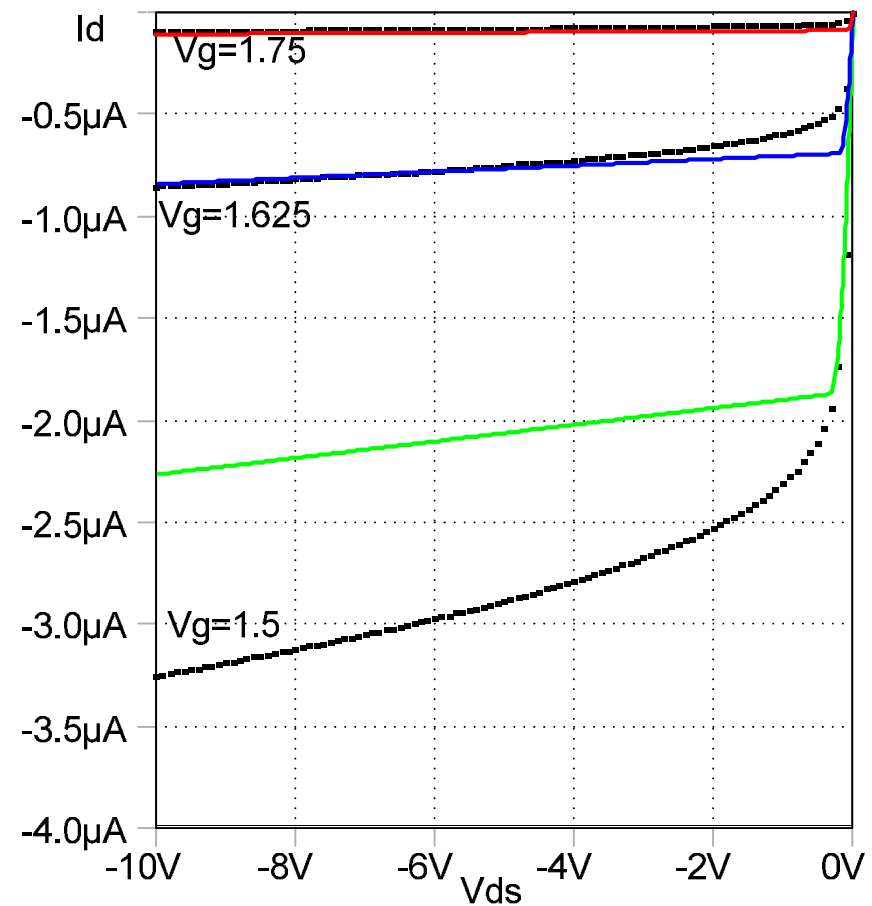
1 – JN260_6; 2 – JN260_6u

Рис. 15. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{GS} для n-JFET при $T=30^\circ\text{C}$

В. БИБЛИОТЕКА CJFET_25.03.20.LIB



JN260_6u



JP50_6u

Рис. 16. Результаты измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) зависимости I_D от V_{DS} при $T=30^\circ\text{C}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В аналитическом обзоре рассмотрены результаты комплексных работ по созданию для САПР LTspice средств моделирования влияния ПР и низких температур на ВАХ BJT 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В библиотеке MN2XA030_25.03.20.lib учет воздействия ПР осуществлен путем применения комбинированных моделей, температурные зависимости ВТ 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.

Литература

- [1] Patterson R.L., Hammoud A., Elbuluk M. Assessment of electronics for cryogenic space exploration missions // Cryogenics. 2006. Vol. 46, N2–3. P. 231–236.
- [2] Buchanan E.D., Benford D.J., Forgione J.B., Moseley S. H., Wollack E.J. Cryogenic applications of commercial electronic components // Cryogenics. 2012. Vol. 52, N10. P. 550–556.
- [3] Cressler J.D. et.al. SiGe Integrated Electronics for Extreme Environments // 4th International Planetary Probe Workshop, Pasadena, CA, June 29, 2006. http://solarsystem.nasa.gov/docs/7_1CRESSLER_pres.pdf.
- [4] Cressler J.D. Low-Temperature Electronics // 6 th International Planetary Probe Workshop, Atlanta, Georgia. Short Course on Extreme Environments Technologies 6/08. http://users.ece.gatech.edu/cressler/publications/short_courses.html
- [5] Goryachev M., Galliou S., Abbé P. Cryogenic transistor measurement and modeling for engineering applications // Cryogenics. 2010. Vol. 50, No 6–7. P. 381–389. doi:10.1016/j.cryogenics.2010.02.002.
- [6] Ferrari G. Measurement currents below 4K. Cryogenic electronics. Milano, November 22, 2012. 14 p
- [7] Мокеев А.С., Карачкин С.В.. Компактная SPICE-модель КНИ МОП-транзистора для проектирования спецстойких СБИС с проектными нормами 0.35 мкм // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2014. № 3. С. 155–158.
- [8] Петросянц К.О., Самбурский Л.М., Харитонов И.А., Ятманов А.П. Компактная макро модель КНИ/КНС МОП-транзистора, учитывающая радиационные эффекты // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. 2011. № 1(87). С. 20-28.
- [9] 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.
- [10] 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. Pp. 200-207 DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545562.
- [11] Володин Э.Н., Дюканов П.А., Смирнов Д.С., Сурков Г.П. Учет воздействия нейтронного облучения на биполярные ИМС ОУ при их схемотехническом моделировании // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2014. № 2 (233). С. 27-32.
- [12] Петросянц К.О., Харитонов И.А., Кожухов М.В., Самбурский Л.М. Схемотехнические SPICE-модели биполярных и МОП-транзисторов для автоматизации проектирования радиационно стойких БИС // Информационные технологии. 2015. Том: 21, № 12. С. 916-922.

- [13] 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 наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемповского. – М.: ИППМ РАН, 2010. С. 301-306.
- [14] Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б. 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.
- [15] 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.
- [16] Radiatsionnyi tsentr 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. pp. 40-41.
- [17] 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.
- [18] Вологдин Э.Н., Лысенко А.П. Интегральное радиационное изменение параметров полупроводниковых материалов: учеб. пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств». М., 1998. 94 с. – Режим доступа: <http://foet.miem.edu.ru>.
- [19] Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И., Вологдин Э.Н., Андреев Ю.Н. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Сов. радио, 1980. 224 с.
- [20] Ardelean J., Hrisoho A., Truong K., Manfredi P.F., Speziali V., Svelto F., Citterio M. Preamplifiers for room temperature and cryogenic calorimetry applications based on DMILL technology // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1996. Vol. A376. P. 217-224.
- [21] 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.
- [22] Устюжанинов В.Н., Чепиженко А.З. Радиационные эффекты в биполярных интегральных микросхемах. М.: Радио и связь, 1989. 144 с.
- [23] Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski 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
- [24] 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, pp. 1-4 DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906794.

Дополнительная литература

1. 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. Russian Microelectronics. – 2016. -Vol. 45, No. 1. - P. 54-62. DOI: 10.1134/S1063739716010030.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Дворников Олег Владимирович

E-mail: oleg_dvornikov@tut.by

Николай Николаевич Прокопенко

Тел: +7 928 120 19 84

E-mail: prokopenko@sssu.ru

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 16-19-00122-П)*

Спасибо за внимание!
