

## Учёт воздействия нейтронного облучения на биполярные ИМС ОУ при их схемотехническом моделировании

*Э.Н. Вологдин, П.А. Дюканов, В.Ф. Синкевич, Д.С. Смирнов, Г.П. Сурков*

*Предложен метод расчёта изменения Spice-параметров биполярных транзисторов при нейтронном облучении без проведения испытаний на соответствующих источниках радиации. Метод основан на измерении стандартных характеристик тестовых структур транзисторов, а также использовании эмпирических зависимостей для коэффициента изменения времени жизни носителей заряда ( $K_T$ ) в кремнии, облучённом нейтронами.*

**Ключевые слова:** биполярный транзистор, Spice-модель, нейтронное облучение.

## Accounting of the neutron irradiation influence on bipolar ICS OS when circuit simulation

*E.N. Vologdin, P.A. Dyukanov, V.F. Sinkevich, D.S. Smirnov, G.P. Surkov*

*The calculation method of changes of the bipolar transistors Spice parameters under neutron irradiation without the respective radiation sources testing is offered. The method is based on measuring the standard characteristics of the transistor test structures, as well as the use of empirical dependencies for the radiation-induced alteration factor of carrier life time ( $K_T$ ) in neutron irradiated silicon.*

**Keywords:** bipolar transistor, the Spice model, neutron irradiation.

### **Введение**

Возможность изменения параметров моделей, используемых в программе схемотехнического моделирования PSpice, делает её удобным инструментом для учёта радиационного воздействия на характеристики интегральных микросхем (ИМС).

Основным элементом, ответственным за деградацию усилительных и точностных параметров биполярных операционных усилителей (ОУ) при нейтронном облучении, является биполярный транзистор (БТ), у которого воздействие радиации наиболее существенно проявляется в деградации коэффициента передачи тока базы  $h_{21E}$ . Изменением динамических параметров ОУ при нейтронном облучении можно пренебречь [1].

Учёт влияния нейтронного воздействия на параметры Spice-модели БТ осуществляется, как правило, путём идентификации параметров моделей после воздействия радиации на тестовые структуры транзисторов ИМС [2]. Такой способ позволяет достаточно точно смоделировать характеристики прибора, но при этом требует идентификации большого количества параметров, зависящих от условий облучения. В работе [3] для учёта условий облучения предлагается использовать соотношения, учитывающие связь параметров Spice-моделей БТ с интегральным потоком излучения через радиационные коэффициенты, которые определяются

из характеристик тестовых структур после облучения.

Несколько иной подход предложен в работах [4, 5], в которых устанавливается взаимосвязь параметров Spice-моделей с наиболее чувствительными к воздействию радиации электрофизическими характеристиками полупроводника (концентрацией основных носителей, временем жизни и подвижностью носителей заряда), рассчитать изменение которых при воздействии радиации можно используя соответствующие эмпирические зависимости (к примеру, представленные в [6]). Такой подход, с одной стороны, позволяет оценивать изменение параметров Spice-моделей без проведения облучения на соответствующих источниках радиации, а с другой стороны, является менее точным, так как выражения, описывающие характеристики БТ, заложенные в его Spice-модели, являются полуполупроводниковыми и не в полной мере отражают физические процессы в транзисторе.

В настоящей работе для учёта изменения параметров Spice-моделей БТ при воздействии нейтронов предлагается использовать соотношения, связывающие параметры Spice-моделей с интегральным потоком нейтронов ( $\Phi_n$ ) через радиационные константы, для нахождения которых используется зависимость  $h_{21E}$  от тока коллектора ( $I_K$ ), рассчитанная с учётом нейтронного воздействия

на БТ методом, предложенным в работе [7] и с использованием эмпирических соотношений для коэффициента радиационного изменения времени жизни  $K_T$  в кремнии, облучённом нейтронами [8]. Такой подход, с одной стороны, позволяет с приемлемой (для схемотехнического моделирования) точностью определить изменение параметров Spice-моделей БТ при нейтронном воздействии, а с другой стороны, не требует проведения облучения тестовых структур транзисторов на соответствующих радиационных установках.

**Параметры Spice-модели биполярного транзистора, определяющие деградацию  $h_{21E}$  при нейтронном воздействии**

В Spice-модели БТ, основанной на модели Гумеля-Пуна, зависимость  $h_{21E}$  от его режима работы задаётся выражением [9]:

$$h_{21E} = \frac{2 \cdot \left(1 - \frac{U_{BK}}{VAF} - \frac{U_{ЭБ}}{VAR}\right)}{1 + \left(1 + 4 \cdot \frac{I_{B1}}{IKF}\right)^{NK}} \times \left(\frac{1}{BF} + \frac{I_{B2}}{I_{B1}}\right)^{-1}, \quad (1)$$

$$I_{B1} = IS \cdot \left(\exp\left\langle \frac{U_{ЭБ}}{NF \cdot \varphi_T} \right\rangle - 1\right),$$

$$I_{B2} = ISE \cdot \left(\exp\left\langle \frac{U_{ЭБ}}{NE \cdot \varphi_T} \right\rangle - 1\right),$$

где  $U_{ЭБ}$  – прямое напряжение на эмиттерном переходе,  $U_{BK}$  – обратное напряжение на коллекторном переходе,  $I_{B1}$  – ток коллектора, обусловленный переносом инжектированных носителей заряда через активную базу,  $I_{B2}$  – генерационный ток в объёме и на поверхности эмиттерного перехода,  $\varphi_T$  – тепловой потенциал.

Описание остальных параметров приведено в таблице 1.

Таким образом, параметрами, определяющими зависимость  $h_{21E}$  от режима работы БТ являются  $BF, I_{B1}, I_{B2}, NK, VAF, IKF$  (величиной  $U_{ЭБ}/VAR$  в (1), как правило, можно пренебречь). Определение перечисленных параметров для необлучённого БТ подробно рассмотрено в работе [10].

**Таблица 1**  
Описание выборочных параметров Spice-модели БТ

Парам.	Описание	Ед.изм.
$BF$	Максимальный $h_{21E}$ , когда допустимо пренебречь зависимостью $h_{21E}$ от $I_K$ и $U_{BK}$	-
$ISE$	Обратный ток эмиттерного перехода	A
$NE$	Коэффициент неидеальности эмиттерного перехода	-
$IKF$	Ток, соответствующий началу спада зависимости $h_{21E}$ от $I_K$ в нормальном режиме	A
$NK$	Показатель степени в зависимости $I_K$ от $IKF$	-
$VAF$	Напряжение Эрли при прямом включении БТ	B
$VAF$	Напряжение Эрли при инверсном включении БТ	B
$IS$	Ток, описывающий перенос неосновных носителей в базе	A
$NF$	Коэффициент неидеальности в нормальном режиме	-

Рассмотрим влияние нейтронного облучения на параметры Spice-модели БТ, представленные в таблице 1.

1) Величину  $BF$  при нейтронном облучении можно записать в соответствии с [3]:

$$\frac{1}{BF_\phi} = \frac{1}{BF_0} + K_{BF} \cdot \Phi_H, \quad (2)$$

где  $BF_0, BF_\phi$  – значение параметра  $BF$  до и после воздействия нейтронов,  $K_{BF}$  – радиационная константа для параметра  $BF$ .

Так как у БТ максимальное значение  $h_{21E}$  определяется отношением времени жизни неосновных носителей заряда в активной базе (АБ) к времени их прохождения через неё, то радиационная константа  $K_{BF}$  должна быть одинаковой для БТ с разной топологией, но изготовленных в одном технологическом процессе и одного типа (npn или pnp).

2) Параметр  $ISE$  при нейтронном облучении можно рассчитать по формуле [3]:

$$ISE_{\phi} = ISE_0 \cdot (1 + K_{ISE} \cdot \Phi_H), \quad (3)$$

где  $ISE_0$ ,  $ISE_{\phi}$  – значение параметра  $ISE$  до и после воздействия нейтронов,  $K_{ISE}$  – радиационная константа для параметра  $ISE$ .

Если при нейтронном облучении возрастающий участок зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$  определяется рекомбинационным током в эмиттерном переходе (ЭП), то радиационная константа  $K_{ISE}$  должна линейно зависеть от площади эмиттерного перехода ( $S_{\text{Э}}$ ). Тогда определив  $K_{ISE}$  для одного БТ, её всегда можно пересчитать для транзистора того же типа, но с другой топологией.

Как правило, при нейтронном облучении возрастающий участок зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$  определяется рекомбинационным током в АБ, в этом случае зависимость константы  $K_{ISE}$  от  $S_{\text{Э}}$  должна быть более сильной, чем линейная, и величину  $K_{ISE}$  следует подбирать индивидуально для каждого вида БТ.

3) Параметр  $NE$  слабо зависит от  $\Phi_H$  [3]. В качестве  $NE$  можно использовать соответствующую величину для необлучённого БТ.

4) Величина  $NK$  определяет скорость спада зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$  [10]. Так как изменение параметров  $BF$  и  $ISE$  при нейтронном облучении влияет на спадающий участок зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$ , то величину  $NK$  следует подбирать для наилучшего совпадения на рассматриваемом участке смоделированной и экспериментально полученной зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$ .

Если рабочая точка БТ лежит на возрастающем или пологом участке зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$ , то изменением

параметра  $NK$  при воздействии радиации можно пренебречь.

5) Изменение параметров  $IS$ ,  $NF$ ,  $VAF$  и  $IKF$  при нейтронном облучении определяется уменьшением концентрации легирующей примеси в АБ транзистора [4]. В реальной радиационной обстановке ( $\Phi_H \leq 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>), изменением концентрации легирующей примеси в АБ, характерной для современных интегральных БТ ( $> 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) можно пренебречь, и следовательно пренебречь изменением параметров  $IS$ ,  $NF$ ,  $VAF$  и  $IKF$ .

В качестве примера, на рисунке 1 для дрейфового БТ npn-типа облучённого несколькими  $\Phi_H$  приводятся экспериментально полученные (точки) и рассчитанные в программе PSpice (сплошные линии) зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$ . Параметры для моделирования  $K_{BF}$  и  $K_{ISE}$  подбирались для наилучшего совпадения расчётной и экспериментально полученной зависимости  $h_{21E}$  от  $I_K$  для облучённого прибора.

Из рисунка 1 видно хорошее для схемотехнического моделирования совпадение экспериментально полученных и рассчитанных в программе PSpice значений  $h_{21E}$  дрейфового БТ, облучённого нейтронами в широком диапазоне  $I_K$ .

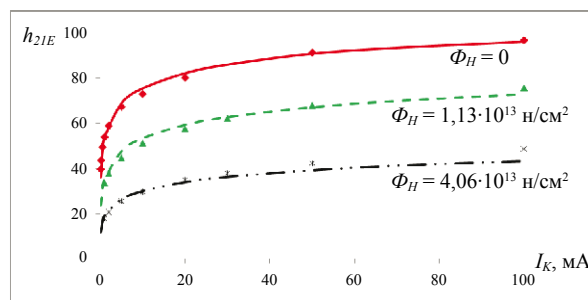


Рис. 1

Зависимость  $h_{21E}$  от  $I_K$  при различных  $\Phi_H$  для БТ npn – типа

Таким образом, нейтронное облучение в большей степени приводит к изменению параметров  $BF$  и  $ISE$  Spice-моделей БТ и в меньшей степени влияет на  $NK$ . Для определения перечисленных параметров достаточно определить в широком диапазоне  $I_K$  деградацию  $h_{21E}$  для БТ, облучённых нейтронами. Причём, рассчитав радиационные константы  $K_{BF}$  и  $K_{ISE}$  по формулам (2) и

(3), можно проводить оценку изменения параметров  $BF$  и  $ISE$  для любого  $\Phi_H$ .

Зависимость  $h_{21E}$  от  $I_K$  для БТ после нейтронного облучения можно получить либо экспериментально на соответствующих радиационных установках, либо расчётным методом.

**Расчётный метод оценки деградации  $h_{21E}$  дрейфовых биполярных транзисторов при нейтронном воздействии**

В качестве метода расчёта деградации  $h_{21E}$  при нейтронном облучении дрейфовых БТ можно воспользоваться методом, предложенным в работе [7]. Метод основан на измерении стандартных характеристик транзистора:  $I_K(U_{ЭБ})$ ,  $f_{ГР}(I_K)$ ,  $C_{Э.БАР.}(U_{ЭБ.ОБР.})$ , где  $f_{ГР}$  – граничная частота,  $C_{Э.БАР.}$  – барьерная ёмкость ЭП,  $U_{ЭБ.ОБР.}$  – обратное напряжение эмиттер-база, из которых находят электрофизические параметры ответственные за радиационную стойкость БТ (в скобках приводится обозначение указанных параметров в Spice-модели БТ):

$t_A$  – время прохождения носителей заряда через АБ ( $TF$ ),

$I_{K0}$  – ток коллектора при  $U_{ЭБ} = 0$  ( $I_{K0} = IS \cdot (1 - U_{БК} / VAF)$ ),

$D_{ЭФ}$  – коэффициент диффузии в АБ со стороны ЭП, при нулевом смещении на нём,

$V_{Э0}$  – контактная разность потенциалов ЭП ( $VJE$ ),

$C_{Э}(0)$  – ёмкость ЭП при нулевом напряжении на нём ( $CJE$ ),

$m$  – коэффициент, учитывающий плавность ЭП ( $MJE$ ).

Используя перечисленные параметры, а также эмпирические соотношения для  $K_{\tau}$  в кремнии, облучённом «быстрыми» нейтронами со средней энергией 1,3 МэВ [8], рассчитывают изменение  $h_{21E}$  по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \frac{1}{h_{21E}} &= \frac{1}{h_{21E_0}} - \frac{1}{h_{21E_{\phi}}} = \\ &= \Delta R_A + \Delta R_{ЭПV} + \Delta R_{ПV}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $h_{21E_0}$ ,  $h_{21E_{\phi}}$  – коэффициент  $h_{21E}$  до и после облучения,

$\Delta R_A$ ,  $\Delta R_{ЭПV}$ ,  $\Delta R_{ПV}$  – изменение

рекомбинационных потерь в АБ, объёме ЭП и в объёме пассивной базы, соответственно.

$$\Delta R_A = t_A \cdot K_{\tau} (\bar{N}_A, \bar{\delta}_A) \cdot \Phi_H, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{ЭПV} &= \frac{q \cdot n_i \cdot \phi_T \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si} \cdot S_{ЭА} \cdot S_{Э\Sigma}}{V_{Э0} \cdot C_{Э}(0) \cdot I_{K0}} \times \\ &\times \left( 1 - \frac{\phi_T}{V_{Э0}} \cdot \ln \left( \frac{I_K}{I_{K0}} \right) \right)^{\frac{1}{m} - 1} \cdot \left( \frac{I_{K0}}{I_K} \right)^{0,5} \times \\ &\times K_{ЭП} \cdot \Phi_H, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{ПV} &= \frac{q \cdot n_i^2 \cdot S_{ЭП} \cdot \sqrt{D} (\bar{N}_П) \cdot \tau (\bar{N}_П)^{-1}}{I_{K0} \cdot \bar{N}_П} \times \\ &\times \left( \sqrt{1 + K_{\tau} (\bar{N}_П, \bar{\delta}_П) \cdot \tau (\bar{N}_П) \cdot \Phi_H} - 1 \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\bar{N}_A$ ,  $\bar{N}_П$  – средняя концентрация легирующей примеси в активной и пассивной базе;  $\bar{\delta}_A$ ,  $\bar{\delta}_П$  – средний уровень инжекции в активной и пассивной базе;  $q$  – заряд электрона;  $n_i$  – концентрация носителей заряда в собственном кремнии;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon_{Si}$  – относительная диэлектрическая проницаемость кремния;  $S_{Э\Sigma}$  – суммарная площадь ЭП, равная сумме площадей ЭП, граничащих с активной ( $S_{ЭА}$ ) и пассивной базой ( $S_{ЭП} = P_{Э} \cdot X_{Э}$ ,  $P_{Э}$  – периметр эмиттера,  $X_{Э}$  – глубина залегания ЭП);  $K_{ЭП}$  – коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей заряда в ЭП;  $D$  – коэффициент диффузии носителей заряда;  $\tau$  – время жизни носителей заряда.

Для дрейфового БТ величины  $\bar{N}_A$ ,  $\bar{N}_П$ ,  $\bar{\delta}_A$ ,  $\bar{\delta}_П$  и  $X_{Э}$  в первом приближении равны:

$$\bar{N}_A = \frac{q \cdot n_i^2 \cdot S_{ЭА}}{I_{K0}} \sqrt{\frac{D_{ЭФ}}{4 \cdot t_A}}, \quad \bar{N}_П \approx 2 \cdot \bar{N}_A,$$

$$\bar{\delta}_A = \left( \frac{q^2 \cdot n_i^2 \cdot S_{ЭА}^2 \cdot D_{ЭФ}}{I_K \cdot I_{КО}} + 1 \right)^{-1},$$

$$\bar{\delta}_П \approx 0,5 \cdot \bar{\delta}_A, \quad X_{Э} = \sqrt{t_A \cdot D_{ЭФ}}.$$

При облучении «быстрыми» нейтронами дрейфового БТ в качестве коэффициента  $K_{ЭП}$  можно использовать величину  $K_{\tau} = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/(\text{н}\cdot\text{с})$ .

Коэффициент диффузии и времена жизни носителей заряда в необлучённом кремнии можно рассчитать по эмпирическим соотношениям [11].

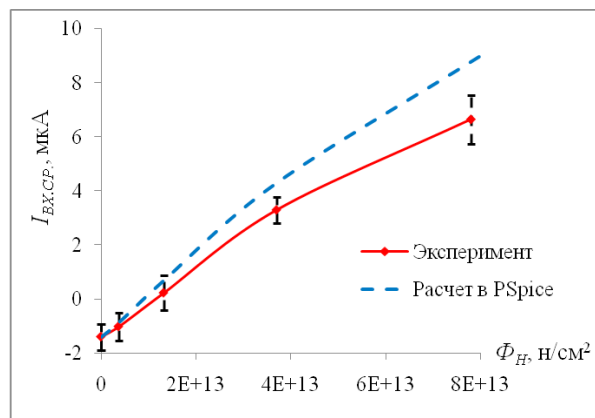
Следует отметить, что выражения (5)-(7) не учитывают поверхностные радиационные эффекты [12], вызванные гамма-излучением, сопутствующим нейтронному воздействию. Поэтому, при использовании предлагаемого метода необходимо проверять чувствительность к поверхностным радиационным эффектам используемой для производства ИМС технологии.

### Экспериментальная часть

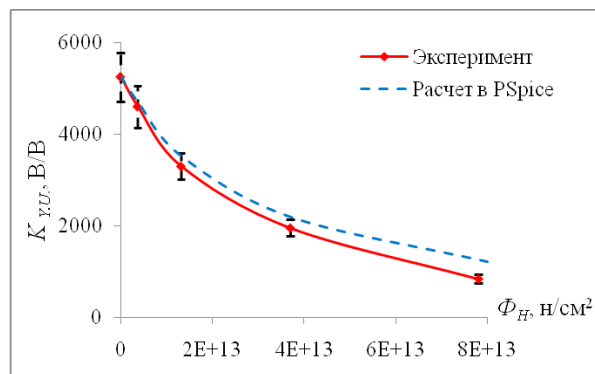
В настоящей работе исследовались быстродействующие ИМС ОУ с обратной связью по напряжению, изготовленные на основе высокочастотной комплементарной биполярной технологии.

Облучение ИМС проводилось «быстрыми» нейтронами при температуре окружающей среды 25 °С. Погрешность дозиметрии не превышала 10 %. Партия ИМС состояла из 5 шт.

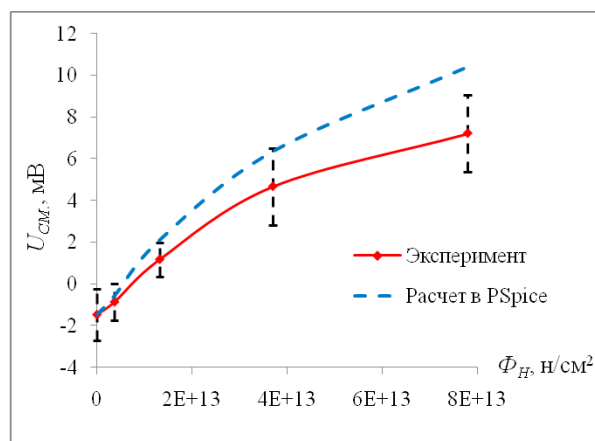
На рисунках 2–4 представлены экспериментально полученные зависимости (сплошные линии) среднего входного тока ( $I_{ВХ.СР}$ ), коэффициента усиления ( $K_{У.У.}$ ) и напряжения смещения ( $U_{СМ.}$ ) от  $\Phi_H$  для исследуемых ИМС ОУ, а также результаты расчёта указанных зависимостей в программе PSpice (пунктирные линии). При расчёте использовались Spice-модели БТ, полученные методом, описанным выше.



**Рис. 2**  
Зависимость  $I_{ВХ.СР}$  от  $\Phi_H$



**Рис. 3**  
Зависимость  $K_{У.У.}$  от  $\Phi_H$



**Рис. 4**  
Зависимость  $U_{СМ.}$  от  $\Phi_H$

Из представленных рисунков 2–4 видно приемлемое для схемотехнического моделирования (с погрешностью около 30 %) совпадение рассчитанных в программе PSpice и экспериментальных данных изменения при воздействии

нейтронов усилительных и точностных параметров для исследуемых ИМС ОУ.

В работе [13] нами исследовалось влияние гамма-излучения на параметры ИМС ОУ, имеющих аналогичную принципиальную электрическую схему с рассматриваемыми в настоящей работе ИМС ОУ и изготовленных с использованием того же технологического процесса. Результаты, полученные в [13], свидетельствуют о слабом влиянии на параметры исследуемых ИМС ОУ накопленной дозы гамма излучения равной 25 кРад (уход параметра  $K_{Y.U.}$  около 10-15 %, а параметров  $I_{BX.CP.}$  и  $U_{CM.}$  около 3-5 %), что соответствует дозе сопутствующего гамма излучения при  $\Phi_H = 8 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup> (т.е. для максимального  $\Phi_H$ , приведённого на рисунках 2-4).

### Заключение

Из представленных результатов следует, что:

- параметрами Spice-модели БТ, определяющими деградацию  $h_{21E}$  при нейтронном облучении, главным образом, являются  $BF$ ,  $ISE$  и, в меньшей степени,  $NK$ ;

- для определения изменения параметров  $BF$ ,  $ISE$ ,  $NK$  при нейтронном облучении БТ достаточно измерения зависимости  $h_{21E}$  в широком диапазоне  $I_K$ ;

- использование метода расчёта деградации  $h_{21E}$  при нейтронном облучении дрейфового транзистора [5] и эмпирических зависимостей для  $K_T$  в кремнии, облучённом нейтронами [7], позволяет оценить изменение усилительных и точностных параметров биполярных ИМС ОУ при нейтронном облучении в программе PSpice с погрешностью около 30%;

- предлагаемый метод расчёта параметров PSpice-модели БТ при нейтронном облучении применим только для ИМС, изменение параметров которых нечувствительно к гамма излучению, сопутствующему нейтронному воздействию.

### Литература

1. Устюжанинов В. Н. Радиационные эффекты в биполярных микросхемах / В. Н. Устюжанинов, А. З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1989. – 144 с.
2. Barnaby H. [et al.] Analysis of bipolar linear circuits response mechanisms for high and low dose rate total dose irradiations // IEEE Transactions on Nuclear Science. – Vol. NS 43. – No 6. 1996. – P. 3040-3048.

3. Петросянц К. О. Модели МДП и биполярных транзисторов для схемотехнических расчётов БИС с учётом радиационного воздействия / К. О. Петросянц, И. А. Харитонов // Микроэлектроника. – Том 23. – Вып. 1. – 1994. – С. 21-34.

4. Дворников О. В. Комплексный подход к проектированию радиационноустойчивых 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. – М.: ИПИМ РАН, 2010. – С. 301-306.

5. Аверьякин А. С. Математическое моделирование полупроводниковых элементов и функционирования схем на их основе после нейтронного облучения / А. С. Аверьякин, А. В. Хананова // ВАНТ серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – Вып. 1. – 2012. – С. 46-50.

6. Вологдин Э. Н. Интегральные радиационные изменения параметров полупроводниковых материалов: учеб. пособие по дисциплине «Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и радиоэлектронных устройств» / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М., 1999. – 94 с.

7. Вологдин Э. Н. Расчётно-экспериментальный метод оценки изменения коэффициента передачи тока биполярного транзистора при гамма-нейтронном облучении / Э. Н. Вологдин, Д. С. Смирнов // Радиационная стойкость электронных систем. «Стойкость-2010»: научно – технический сборник. – Вып. 13. – М.: СПЭЛС, 2010. – С. 81-82.

8. Вологдин Э. Н. Эмпирические соотношения для зависимости коэффициента радиационного изменения времени жизни носителей заряда в кремнии при нейтронном облучении от уровня инжекции и степени легирования / Э. Н. Вологдин, Д. С. Смирнов // ВАНТ серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – Вып. 2. – 2010. – С. 17-22.

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

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

11. Мулярчик С.Г. Численное моделирование микросистемных структур. – М.: Университетское, 1989. – 368 с.

12. Першенков В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.

13. Виноградов Р. Н. Исследование деградации параметров интегральных микросхем операционных усилителей при воздействии ионизирующего излучения космического пространства / Р. Н. Виноградов, Э. Н. Вологдин, П. А. Дюканов, С. В. Корнеев, Е. М. Савченко, Д. С. Смирнов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – Вып. 2. – С. 28-33.