

УДК 539.16.04

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ  
ПРИ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

© 2013 г.

*А.В. Хананова, А.С. Аверяскин*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт  
технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск

snow@vniitf.ru

Поступила в редакцию 26.12.2012

Представлен способ учета влияния нейтронного облучения на электронные компоненты путем изменения параметров их моделей. С помощью приведенных формул параметры SPICE-моделей биполярного транзистора и полупроводникового диода пересчитываются в зависимости от флюенса нейтронов. Для учета ионизации в электрические схемы предлагается вводить генераторы электрического тока. Приведены результаты моделирования участков схем.

*Ключевые слова:* математическая модель, радиационные эффекты, биполярный транзистор, полупроводниковый диод.

**Введение**

В настоящее время при разработке радиоэлектронной аппаратуры широко используются программы схемотехнического моделирования. Модификация математических моделей, используемых в таких программах, дает возможность рассчитывать работу электрических схем с учетом радиационных эффектов. В статье рассмотрен метод изменения параметров моделей некоторых полупроводниковых элементов для учета нейтронного облучения, а также использования схемотехнических решений для учета воздействия гамма-излучения.

**Изменение характеристик  
полупроводникового материала  
при облучении**

Известно, что от нейтронного воздействия зависят технологические и электрофизические параметры полупроводника, такие как время жизни носителей заряда в полупроводнике и удельное сопротивление полупроводника [1, 2].

Зависимость времени жизни носителей заряда в полупроводнике от флюенса нейтронов имеет вид [1]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + K_{\tau} \Phi_n, \quad (1)$$

где  $\tau_0$ ,  $\tau$  – время жизни носителей заряда до и после облучения соответственно, с;  $K_{\tau}$  – коэффициент радиационного изменения времени жизни носителей, см<sup>2</sup>/(нейтрон·с);  $\Phi_n$  – флюенс нейтронов, нейтрон/см<sup>2</sup>.

Зависимость удельного сопротивления полупроводника от флюенса нейтронов выражается формулой [1]

$$\rho = \rho_0 \exp(K_{\rho} \Phi_n), \quad (2)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  – удельное сопротивление материала до и после облучения соответственно, Ом·см;  $K_{\rho}$  – коэффициент радиационного изменения удельного сопротивления, см<sup>2</sup>/нейтрон.

**Влияние нейтронного облучения  
на параметры модели транзистора**

Параметры математической модели биполярного транзистора зависят от технологических характеристик и электрофизических свойств полупроводникового материала, меняющихся при облучении согласно (1), (2). Основной вклад в изменение характеристик вносят такие параметры, как [3]:

1) ток насыщения в эмиттерном переходе  $I_{F0}$

$$I_{F0} = \left[ \frac{(p_{n0})_{\varepsilon} \sqrt{(D_p)_{\varepsilon} (1 + K_{\tau\varepsilon} \Phi_n \tau_{0\varepsilon})}}{\sqrt{\tau_{0\varepsilon}}} + \frac{(n_{p0})_{\delta} \sqrt{(D_n)_{\delta} (1 + K_{\tau\delta} \Phi_n \tau_{0\delta})}}{\sqrt{\tau_{0\delta}}} \right] S_{\varepsilon} q; \quad (3)$$

2) ток насыщения в коллекторном переходе  $I_{R0}$

$$I_{R0} = \left[ \frac{(p_{n0})_{\kappa} \sqrt{(D_p)_{\kappa} (1 + K_{\tau\kappa} \Phi_n \tau_{0\kappa})}}{\sqrt{\tau_{0\kappa}}} + \frac{(n_{p0})_{\delta} \sqrt{(D_n)_{\delta} (1 + K_{\tau\delta} \Phi_n \tau_{0\delta})}}{\sqrt{\tau_{0\delta}}} \right] S_{\kappa} q; \quad (4)$$

3) коэффициент усиления в схеме с общей базой  $\alpha_N$

$$\alpha_N = \left( 1 - \frac{\rho_{0\varepsilon} \exp(K_{\rho\varepsilon} \Phi_n)}{\rho_{0\delta} \exp(K_{\rho\delta} \Phi_n)} \right) \left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{I_{\delta}^2}{(D_n)_{\delta} \tau_{\delta}} \right) \right). \quad (5)$$

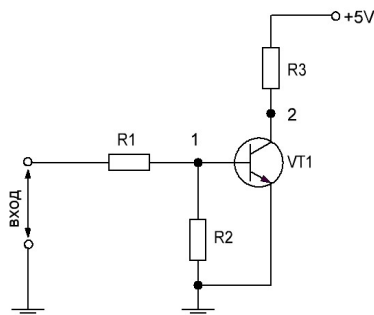


Рис. 1. Схема логического инвертора на основе биполярного транзистора  
( $R1 = R3 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R2 = 1 \text{ кОм}$ )

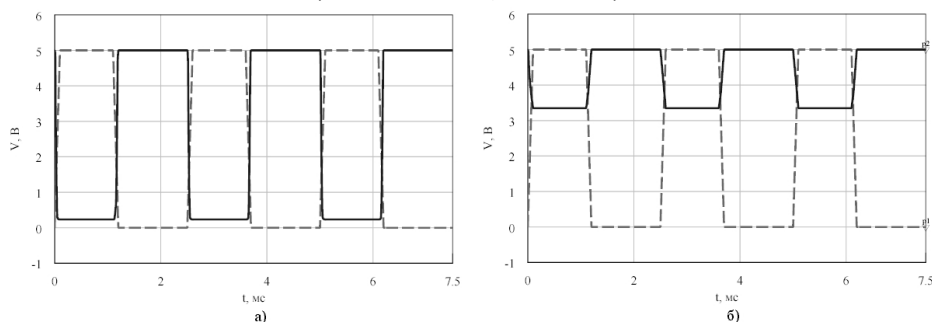


Рис. 2. Работа инвертора: а) в штатном режиме; б) после нейтронного облучения  
(пунктирная линия – входной сигнал, сплошная – выходной)

Основные параметры SPICE-модели биполярного транзистора выражаются через параметры  $I_{F0}$ ,  $I_{R0}$ ,  $\alpha_N$  следующим образом:

$$BF = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N}, \quad BR = \frac{\alpha_N I_{F0}}{I_{R0} - \alpha_N I_{F0}}, \quad (6)$$

$$IS = I_{F0} \alpha_N.$$

#### Пример расчета схемы на основе биполярного транзистора

Для иллюстрации возможности моделирования реакции схем на нейтронное облучение была выбрана схема логического инвертора на основе биполярного транзистора (рис. 1).

Параметры модели биполярного транзистора были определены методом экстракции с использованием данных ТУ. Коэффициенты радиационного изменения времени жизни носителей заряда  $K_\tau$  и удельного сопротивления  $K_\rho$  были выбраны в соответствии с данными [4]. Электрофизические параметры материалов для оценок приняты равными характерным величинам и подобраны для соответствия данным ТУ.

На вход инвертора подается прямоугольный сигнал, выходной сигнал снимается с узла 2 (рис. 1). При работе в штатном режиме происходит преобразование входного сигнала высокого уровня в выходной сигнал низкого уровня, а сигнала низкого уровня – в сигнал высокого (рис. 2а). После нейтронного облучения при выбранных номиналах резисторов не происхо-

дит преобразования сигнала из-за уменьшения коэффициента усиления транзистора (рис. 2б).

#### Пример расчета схемы на основе полупроводникового диода

Для иллюстрации возможности моделирования реакции схем на гамма- и нейтронное облучение была выбрана схема двухполупериодного выпрямителя на основе диодной матрицы (рис. 3).

Параметры модели полупроводникового диода были определены методом экстракции с использованием данных ТУ. Электрофизические параметры материалов диода приняты равными характерным величинам и подобраны для соответствия данным ТУ.

Ионизация, вызванная воздействием гамма-излучения, приводит к разрядке конденсатора и увеличению обратных токов диодов. Генераторы тока G1–G4 моделируют обратные токи диодов VD–VD4, а генератор тока G5 моделирует ток утечки конденсатора C1.

На рисунке 4 показаны значения всех переменных, а также формулы для расчета параметров SPICE-модели диода и амплитуды тока  $I_{\max}$  генераторов G1–G4.

На вход выпрямителя подаются прямоугольные импульсы напряжения (рис. 3), а выходной сигнал снимается с резистора R1.

При работе в штатном режиме уже на десятой микросекунде на выходе получается выпрямленное напряжение (рис. 5а). После ней-

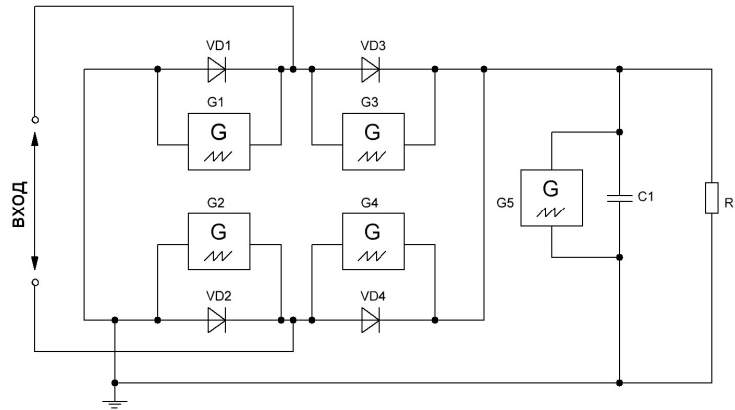


Рис. 3. Схема двухполупериодного выпрямителя на основе диодной матрицы (R1= 0,1 МОм, C1= 0,15 мкФ)

$$q=1.6e-19$$

$$\begin{array}{lll} Dp=6 & pn0=1e12 & t0p=1e-6 \\ Dn=27 & np0=1e10 & t0n=2e-5 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} S=0.0156 \\ L=8.1e-6 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} Kr=5e-15 \\ Kt=5e-8 \\ Kg=3.5e13 \\ Kcg=2e-12 \end{array}$$

$$RS0=0.88$$

$$TIMEimp=\{0, Timp, 0.317+Timp, 0.6+Timp, 1.25+Timp, 1.29+Timp, 1.38+Timp, 1.44+Timp, 1.46+Timp, 200\} * 1e-6 /\_TIME\_U$$

$$CURImp=\{0, 0, 0.236, 0.036, 0, 1, 0.036, 0.491, 0, 0\} /\_CURR\_U$$

$$IS1=pn0*((Dp*(1+Kt*Fn*t0p))/t0p)^(1/2)$$

$$IS2=np0*((Dn*(1+Kt*Fn*t0n))/t0n)^(1/2)$$

$$RS=RS0*exp(Kr*Fn)/\_RES\_U$$

$$IS=S*q*(IS1+IS2)/\_CURR\_U$$

$$Imax=q*S*Pgmax*L*Kg$$

$$\begin{array}{l} RS: 130.6 \\ IS: 4.458e-5 \\ Imax: 0.7076 \end{array}$$

Рис. 4. Расчет параметров SPICE-модели диодов и токов ионизации

тронного облучения выпрямление входного сигнала происходит значительно позже, что объясняется увеличением объемного сопротивления материала диода (рис. 5б).

При воздействии импульса гамма-излучения происходит резкое падение выходного напряжения вследствие разрядки конденсатора и протекания обратных токов через диоды (рис. 5в). В случае воздействия импульса гамма-излучения на схему, предварительно облученную флюенсом нейтронов, также происходит падение выходного напряжения, при этом восстановление происходит гораздо медленнее из-за деградации параметров диодов (рис. 5г).

## Заключение

Разработанные математические модели полупроводникового диода и биполярного транзистора, использующие зависимости их основных параметров от флюенса нейтронов, позволяют производить расчеты работы электронных схем после нейтронного облучения. Показанные в статье схемотехнические решения позволяют рассчитывать реакцию схемы при воздействии импульса гамма-излучения. Комбинирование данных подходов дает возможность моделировать эффекты совместного гамма-нейтронного облучения.

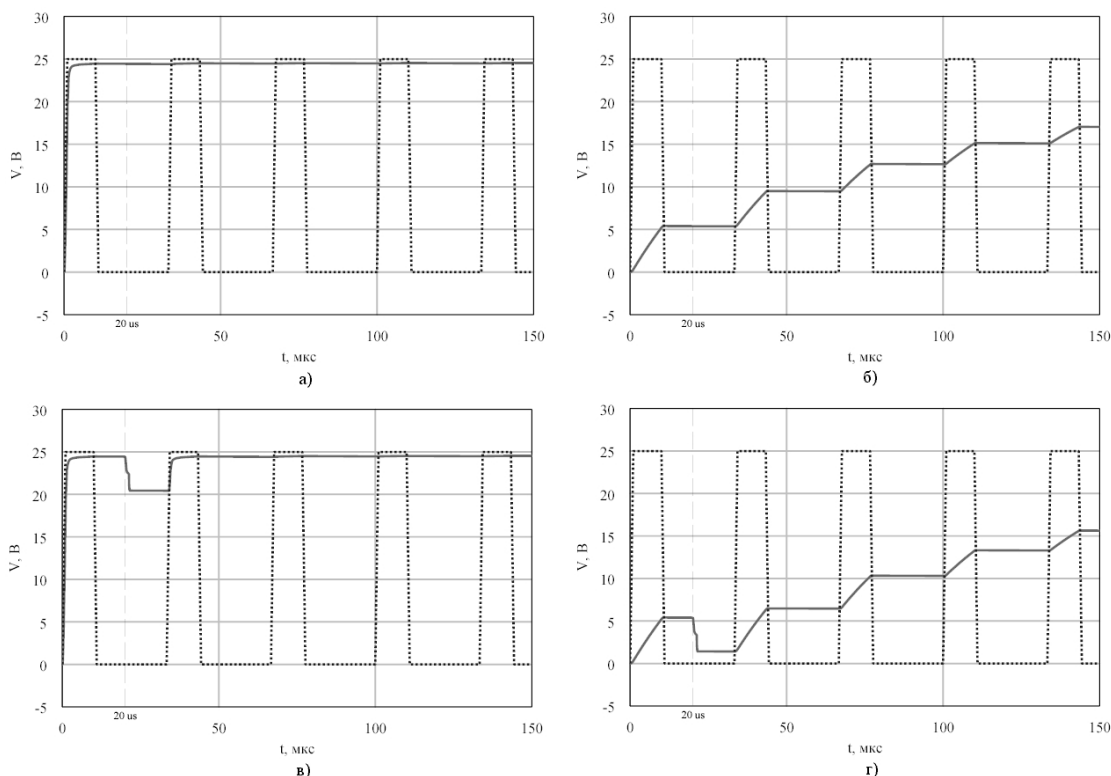


Рис. 5. Работа выпрямителя: а) в штатном режиме; б) после нейтронного облучения; в) при воздействии импульса гамма-излучения; г) после нейтронного облучения при воздействии импульса гамма-излучения (пунктирная линия – входной сигнал, сплошная – выходной)

*Список литературы*

1. Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969.
2. Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. М.: Советское радио, 1980.

3. Аверьякин А.С, Хананова А.В. Математическое моделирование полупроводниковых элементов и функционирования схем на их основе после нейтронного облучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». 2012. Вып. 1. С. 46–50.
4. Патрикеев Л.Н. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: МИФИ, 1975.

**SIMULATING ELECTRONIC CIRCUIT PERFORMANCE UNDER RADIATION EXPOSURE**

*A.V. Khananova, A.S. Averyaskin*

A procedure is proposed to account for the effect of neutron irradiation on electronic components by varying the parameters of their models. The formulas are given to calculate SPICE model parameters of a bipolar transistor and a semiconductor diode depending on the neutron fluence. Electric current generators are to be integrated into the electric circuits to take into account ionizing radiation effects. Simulation results for some circuit sections are presented.

*Keywords:* mathematical model, radiation effects, bipolar transistor, semiconductor diode.