

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНО-ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

К. В. ЧЕРКАСОВ, С. А. МЕШКОВ, М. О. МАКЕЕВ, Ю. А. ИВАНОВ,
Н. А. ВЕТРОВА, Н. В. ФЕДОРКОВА

*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, Россия
E-mail: bauman@bmstu.ru*

Резонансно-туннельные диоды (РТД) являются перспективными элементами для применения в приемопередающих устройствах СВЧ- и КВЧ-диапазонов, в частности, в нелинейных преобразователях частоты радиосигналов. Использование РТД в качестве нелинейных элементов позволяет улучшить электрические параметры назначения преобразователей, а также расширить рабочий диапазон частот вплоть до терагерцового. Исследована кинетика вольт-амперной характеристики (ВАХ) РТД в заданных условиях эксплуатации при воздействии повышенной температуры и ионизирующих излучений. Разработаны математические модели, описывающие деградацию ВАХ РТД под действием повышенной температуры и гамма-излучения. Полученные модели легли в основу программного комплекса, позволяющего моделировать кинетику ВАХ РТД, вызванную действием указанных факторов. Результаты моделирования верифицированы с экспериментальными данными.

Ключевые слова: *резонансно-туннельный диод, кинетика вольт-амперной характеристики, ионизирующие излучения, повышенная температура, GaAs/AlGaAs резонансно-туннельные гетероструктуры*

Нелинейные преобразователи частоты (ПЧ) радиосигналов являются ключевыми элементами радиотехнических систем. Одним из путей усовершенствования ПЧ радиосигналов является использование наноэлектронных приборов, к которым относятся резонансно-туннельные диоды (РТД) на основе AlGaAs/GaAs многослойных гетероструктур с поперечным токопереносом. Применение РТД в качестве нелинейного элемента ПЧ радиосигналов позволяет улучшить электрические параметры преобразователей путем подбора оптимальной формы вольт-амперной характеристики (ВАХ) нелинейных элементов. В работах [1–6] рассмотрены перспективы использования РТД в качестве нелинейного элемента диодных смесителей радиосигналов различных типов [3], приведены сравнительные характеристики смесителей на диодах с барьером Шоттки и РТД [2–6]. В [4] описана методика выбора оптимальной ВАХ РТД, показана „конфликтность“ параметров смесителя. Установлено, что применение РТД в качестве нелинейного элемента смесителей радиосигналов позволяет расширить их динамический диапазон. Рабочий диапазон частот РТД простирается вплоть до терагерцового, что позволяет рассматривать эти диоды как перспективные элементы СВЧ- и КВЧ-электроники. Производство РТД возможно в рамках отработанных технологий микроэлектроники.

При проектировании ПЧ радиосигналов необходимо обеспечить надежность в заданных условиях эксплуатации. Для ПЧ радиосигналов на базе РТД эта задача представляет особый интерес в силу малой изученности. Как показали предварительные исследования [5–8], надежность ПЧ радиосигналов на основе РТД определяется надежностью нелинейного элемента, а исследования в этом направлении целесообразно вести с использованием модели надежности по постепенным отказам. Эта модель учитывает закономерности изменения электрических параметров ПЧ под действием дестабилизирующих факторов вплоть до параметрического отказа прибора.

Целью настоящей работы является создание математических моделей воздействия повышенной температуры и гамма-излучения на ВАХ РТД с разработкой на их основе соответствующего программного обеспечения для анализа кинетики ВАХ РТД с возможностью последующего использования в задачах анализа и обеспечения надежности ПЧ радиосигналов на базе РТД.

Задачу моделирования кинетики ВАХ РТД можно разделить на три основных этапа: 1) моделирование ВАХ диода, функционирующего до воздействия стабилизирующих факторов; 2) моделирование воздействия (повышенной температуры или дозы ИИ) на электрофизические характеристики материалов и параметры конструкции РТД; 3) моделирование ВАХ диода после воздействия.

В разработанном нами программном комплексе моделирование ВАХ РТД производится по формуле Цу-Есаки [8]. Функция источника носителей зарядов представляет собой распределение Ферми—Дирака, туннельная прозрачность резонансно-туннельной структуры (РТС) диода рассчитывается методом матрицы переноса [9].

Моделирование ВАХ РТС диода выполняется на основе параметров конструкции гетероструктуры: толщине слоев спейсеров, барьеров и ямы, а также концентрации Al в этих слоях. Для получения ВАХ РТД необходимо учесть влияние на ВАХ омических контактов (ОК) и приконтактных областей (ПКО, легированных участков гетероструктуры между ОК и РТС диода) (рис. 1). Эти элементы РТД формируют последовательное сопротивление R_s потерь, в то время как РТС диода ответственна за N-образную форму ВАХ с отрицательным участком дифференциального сопротивления.

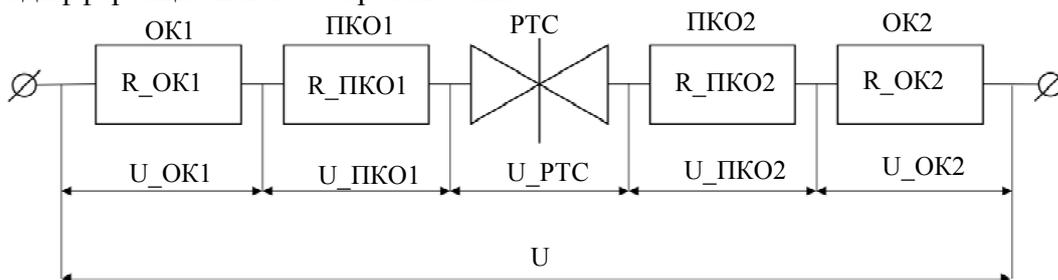


Рис. 1

Входными параметрами для моделирования ВАХ РТД являются смоделированная ВАХ РТС (в виде пары векторов „напряжение—ток“), а также удельное сопротивление, площадь омических контактов диода, данные о степени легирования, протяженность и площадь поперечного сечения приконтактных областей. Сопротивление омических контактов диода определяется из их площади и удельного сопротивления, методика расчета удельного сопротивления участков приконтактной области описана ниже.

На основе анализа литературных данных и результатов экспериментальных исследований воздействия высокой температуры [10—22] и дозы ИИ [23—55] на электрические характеристики полупроводниковых устройств разработана математическая модель, позволяющая моделировать кинетику ВАХ РТД под действием указанных дестабилизирующих факторов.

В модели, описывающей воздействие повышенной температуры на РТД, учитываются межслойная диффузия в гетероструктуре, изменяющая условия токопереноса в области резонансного туннелирования электронов и в приконтактных областях, а также диффузионная деградация омических контактов диода.

Моделирование диффузии в гетероструктуре производится численно методом конечных элементов с шагом в один монослой (0,283 нм) исходя из коэффициентов диффузии, определяемых из соотношения:

$$D(T) = D_0 e^{-\frac{E}{kT}} \left(\frac{n_{Si}}{n_i} \right)^3 \quad (1)$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации диффузии; T — температура; n_{Si} — концентрация легирующей примеси (кремния), см^{-3} ; n_i — концентрация собственных носителей заряда, см^{-3} ; k — постоянная Больцмана.

Термическая деградация омических контактов описывается уравнением, связывающим температуру воздействия, время воздействия и приращение удельного сопротивления [8]:

$$\Delta\rho(T) = \chi e^{-\frac{E_{ок}}{2kT}} \sqrt{t} \quad (2)$$

где t — время воздействия, с; $E_{ок}$ — энергия активации диффузии в омических контактах (1 эВ для AuGeNi [11, 12]); χ — коэффициент, зависящий от конструкции и технологии изготовления омических контактов, $(\text{Ом}\cdot\text{см}^2)/\text{с}^{1/2}$.

Значение удельного сопротивления, рассчитанное по (2), используется на этапе моделирования кинетики ВАХ РТД после воздействия повышенной температуры.

По результатам проведенных нами исследований макетов РТД трех производителей коэффициент χ для диодов первого типа можно принять равным $2,2 \cdot 10^{-4}$, $2,95 \cdot 10^{-3}$ — для второго и $2,5 \cdot 10^{-4}$ $(\text{Ом}\cdot\text{см}^2)/\text{с}^{1/2}$ — для третьего. Расчет χ по представленной в [20] кинетике удельного сопротивления ОК показал, что для данного типа контактов $\chi = 2,903 \cdot 10^{-5}$ $(\text{Ом}\cdot\text{см}^2)/\text{с}^{1/2}$. Таким образом, различие между значениями данного коэффициента у макетов диодов разных производителей может достигать двух порядков, это обусловлено зависимостью коэффициента χ от параметров конструкции и технологии изготовления РТД. Это обуславливает необходимость предварительного определения коэффициента χ посредством натурального эксперимента.

Предложенная модель позволяет прогнозировать диффузионные изменения ВАХ РТС и сопротивления R_s диода как на стадии эксплуатации, так и на этапе изготовления. Описываемая (1) межслойная диффузия в резонансно-туннельной гетероструктуре оказывает заметное влияние на ВАХ диода только при температурах, характерных для некоторых технологических операций изготовления РТД, таких как эпитаксиальное выращивание, отжиг гетероструктуры, вжигание омических контактов. На этапе эксплуатации температура, воздействующая на РТД, как правило, не превышает $200\text{ }^\circ\text{C}$ и доминирующим процессом, обуславливающим кинетику ВАХ РТД, является деградация его омических контактов (2).

Воздействие ИИ приводит к изменению электрических свойств полупроводникового материала, таких как концентрация, время жизни и подвижность носителей заряда [45—56]. Эти изменения, в свою очередь, приводят к изменению ВАХ РТД.

При небольших значениях флюенса Φ изменение концентрации носителей заряда выражается зависимостью [48]:

$$n = n_0 (1 - a_n \Phi), \quad (3)$$

где n_0 — исходная концентрация носителей заряда; a_n — коэффициент скорости удаления носителей заряда под действием ИИ.

Изменение подвижности μ_n может быть выражено следующей формулой [48]:

$$\frac{1}{\mu_n} = \frac{1}{\mu_0} (1 + b_\mu \Phi), \quad (4)$$

где μ_0 — исходная подвижность; b_μ — коэффициент изменения подвижности под воздействием излучения.

Коэффициенты a_n и b_μ определяются исходя из степени легирования как для объемных, так и для эпитаксиальных слоистых образцов [48]:

$$a_n = 7,2 \cdot 10^{-4} n_0^{-0,77}, \text{ см}^2, \quad (5)$$

$$b_\mu = 7,8 \cdot 10^{-6} n_0^{-0,64}, \text{ см}^2. \quad (6)$$

Приведенные зависимости описывают изменение подвижности и концентрации носителей зарядов от Φ , что может быть использовано для моделирования воздействия ИИ на приконтактные области исследуемых образцов. Это воздействие выражается в изменении положения уровня Ферми источника электронов, а также в увеличении удельного сопротивления приконтактных областей. Для описания первого эффекта описанную выше методику расчета ВАХ диода надлежит дополнить уравнениями, позволяющими учесть влияние этих параметров на электрические характеристики РТД, а именно перевести уровень Ферми E_F из вводимых параметров модели в расчетные, используя формулу [56]:

$$E_F(n) = E_g - kT \ln \left(\frac{N_c}{n} \right), \quad (7)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны; T — температура; N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости; n — концентрация электронов после облучения

$$N_c(T) = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (8)$$

где m_e^* — эффективная масса электрона, h — постоянная Планка.

Описываемое уравнениями (7) и (8) изменение положения уровня Ферми источника электронов оказывает непосредственное влияние на резонансное туннелирование в РТС диода и, как следствие, форму его ВАХ.

Удельное сопротивление участка приконтактной области РТД определяется как сопротивление объемного полупроводника:

$$\rho_{\text{ПКО}} = \frac{1}{q\mu_n n}, \quad (9)$$

где q — заряд электрона.

Уравнение (9) связывает описываемое (3) и (4) изменение концентрации и подвижности носителей заряда в приконтактной области с изменением сопротивления R_S РТД, обусловленного ростом удельного сопротивления приконтактных областей.

Помимо деградации AlAs/GaAs полупроводниковой гетероструктуры в РТД под действием ИИ происходит деградация омических контактов. В [40] исследованы омические контакты на основе Au—AuGe, наиболее часто применяемые в широкой номенклатуре приборов на основе GaAs. Исследования контактного сопротивления показали стойкость таких контактов до 10^7 рад — сопротивление при данных дозах изменяется не более чем на 1 %. При 10^8 рад и выше наблюдается резкое увеличение контактного сопротивления — до 170 % от исходных величин при дозе порядка 10^9 рад. С учетом этого деградация сопротивления омических контактов при воздействии доз ИИ порядка 10^7 — 10^9 рад может быть описана следующей зависимостью:

$$\Delta R / R_0 = \alpha \sqrt{D}, \quad (10)$$

где ΔR — увеличение контактного сопротивления под действием ИИ; R_0 — контактное сопротивление до воздействия ИИ; D — поглощенная доза ИИ, рад; α — коэффициент вос-

приемчивости ОК к воздействию ИИ (расчет по представленным в [40] данным дает $\alpha = 2,05 \cdot 10^{-5} \text{ рад}^{-1/2}$).

Аналогично (2) результаты расчета по (9) и (10) используются на этапе моделирования ВАХ РТД после воздействия ИИ, отражая влияние изменения сопротивления ОК на кинетику характеристик.

На основе представленных математических моделей разработан программный комплекс RTSVAC [57], позволяющий рассчитывать начальный участок ВАХ РТД и моделировать ее кинетику под действием дестабилизирующих факторов. Для оценки точности моделирования используются макеты РТД двух типов. Объем выборки диодов каждого типа составляет 14 шт. РТС исследуемых макетов диодов приведены в табл. 1 и 2. Для измерения ВАХ макетов РТД используется стенд, состоящий из микрозондового устройства SIGNATON S-1160 PROBE STATION, источника питания Agilent E3641A и персонального компьютера. Стенд позволяет проводить измерения ВАХ РТД в диапазоне напряжений от 0 до 36 В с погрешностью $\Delta U = \pm 1 \text{ мВ}$ и токов от 0 до 1 А с погрешностью $\Delta I = \pm 10 \text{ мкА}$.

Таблица 1

| № | Слой | Состав | Толщина, нм |
|---|---------------------------------|--------|-------------|
| 1 | Спейсер | GaAs | 6,3 |
| 2 | Резонансно-туннельная структура | AlAs | 29 |
| 3 | | GaAs | 49 |
| 4 | | AlAs | 29 |
| 5 | Спейсер | GaAs | 6,3 |

Таблица 2

| № | Слой | Состав | Толщина, нм |
|---|---------------------------------|--------|-------------|
| 1 | Спейсер | GaAs | 6,3 |
| 2 | Резонансно-туннельная структура | AlAs | 29 |
| 3 | | GaAs | 49 |
| 4 | | AlAs | 29 |
| 5 | Спейсер | GaAs | 21 |

Поскольку технологический разброс измеренных ВАХ обеих выборок макетов диодов находится в пределах погрешности измерений, для дальнейшего сравнения с расчетными данными используются осредненные ВАХ каждой выборки (рис. 2).

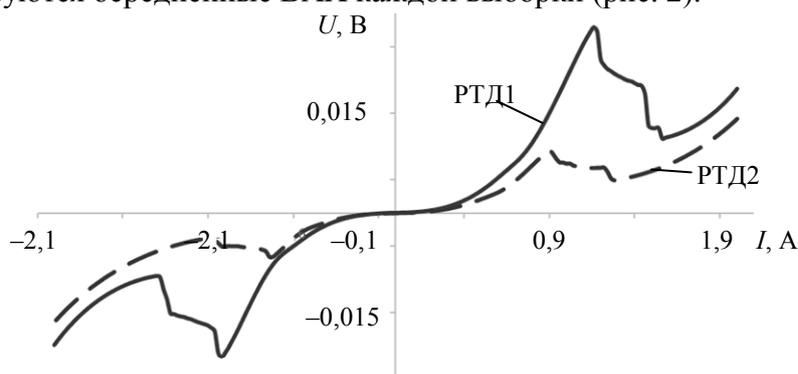


Рис. 2

Количественная оценка точности моделирования производится путем сравнения осредненной экспериментальной ВАХ выборки из 14 макетов диодов и результата моделирования ВАХ РТД обоих типов (рис. 3). Поскольку в настоящей работе РТД рассматривается как нелинейный элемент диодного смесителя СВЧ-радиосигналов, моделирование и оценка точности выполняются на начальном участке ВАХ от нуля до падающего участка. Оценка производится по величине модуля разности токов осредненной экспериментальной и расчетной ВАХ для макетов диодов обоих типов. Максимальное расхождение по току исходных (до

воздействий) расчетной и экспериментальной ВАХ для РТД2 на рассматриваемом участке составляет 4,65 %, для — РТД1 — 3,37 %.

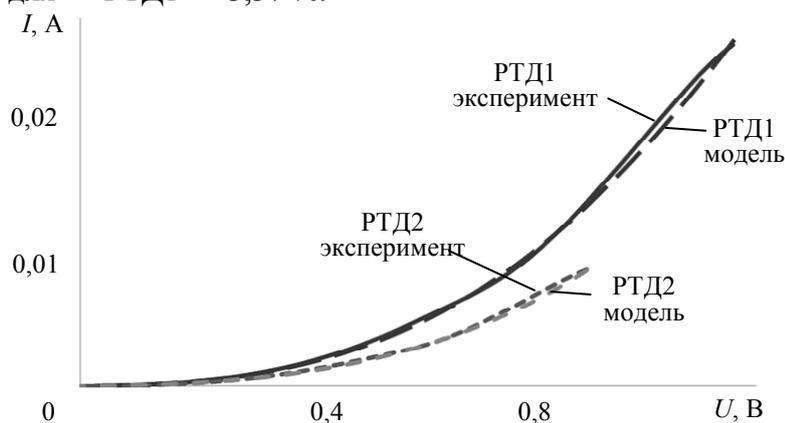


Рис. 3

Оценка точности моделирования кинетики ВАХ выполняется посредством сравнения смоделированных ВАХ с экспериментально полученными для случаев воздействия ионизирующего излучения и повышенной температуры. Для макетов диодов обоих типов измерены ВАХ до и после воздействия температуры 300 °С в течение 4 ч и дозы ИИ 10,8 Мрад. Воздействия смоделированы с помощью разработанного программного комплекса. При моделировании воздействия повышенной температуры максимальное отклонение смоделированной ВАХ от экспериментальной составляет 4,46 % для РТД1, и 5,12 % для РТД2. Оценка точности моделирования кинетики ВАХ РТД под действием дозы гамма-излучения показывает, что для РТД1 максимальное отклонение по току смоделированной ВАХ от экспериментальной на рассматриваемом участке составило 5,06 %, для диода типа РТД2 — 5,64 %.

Разработанный программный комплекс позволяет производить моделирование начального участка ВАХ РТД с погрешностью не более 5 % без воздействия дестабилизирующих факторов и не более 6 % при воздействии ионизирующего излучения или повышенной температуры.

Таким образом, в настоящей работе предложены математические модели и создан программный инструмент для моделирования кинетики ВАХ РТД под действием дестабилизирующих факторов эксплуатации. На его основе предполагается построить программный комплекс для моделирования показателей назначения ПЧ радиосигналов, что позволит решить задачи анализа показателей их надежности и обеспечения требуемых показателей надежности по постепенным отказам в заданных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Федоренко И. А. и др. Улучшение параметров смесителей радиосигналов за счет применения резонансно-туннельных диодов // Техника и приборы СВЧ. 2011. № 2. С. 1—9.
2. Ветрова Н. А., Мешков С. А., Иванов Ю. А., Назаров В. В., Синякин В. Ю., Федоренко И. А., Федоркова Н. В., Шашурин В. Д. Перспективы разработки нелинейных преобразователей на базе резонансно-туннельных диодов // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2012. № 4.
3. Иванов Ю. А., Мешков С. А., Шашурин В. Д., Федоркова Н. В., Федоренко И. А. Субгармонический смеситель с улучшенными интермодуляционными характеристиками на базе резонансно-туннельного диода // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 8. С. 982—988.
4. Федоренко И. А., Федоркова Н. В., Шашурин В. Д., Иванов Ю. А. Спектральные характеристики субгармонического смесителя радиосигналов на основе резонансно-туннельного диода // Междунар. Крымская конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“ (КрыМиКо’2011). Тез. докл. Севастополь, 2011. С. 181—182.

5. Иванов А. И., Дукач И. А., Иванов Ю. А., Мешков С. А., Макеев М. О., Федоркова Н. В. Исследование деградации преобразователей частоты СВЧ-радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. М., 2013. Т. 13, № 3. С. 69—71.
6. Макеев М. О., Иванов Ю. А., Мешков С. А., Литвак Ю. Н., Ветрова Н. А. Исследования деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs наногетероструктур // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. Вып. 6 [Электронный ресурс]: <<http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/811.html>>.
7. Макеев М. О., Иванов Ю. А., Мешков С. А. Исследование деградационных явлений в наноразмерных AlAs/GaAs гетероструктурах методом ИК-спектроскопии // Наноинженерия. 2011. № 4. С. 44—48.
8. Esaki L., Tsu R. Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors // IBM J. of R&D. 1970. Vol. 14, N 1. P. 61—65.
9. Pérez-Álvarez R., Garcia-Molliner F. Transfer Matrix, Green Function and Related Techniques: Tools for the Study of Multilayer Heterostructures. Castelló de la Plana, Publicacions de la Universitat Jaume I, 2004. 285 p.
10. Макеев М. О. Разработка конструкторско-технологических методов и средств повышения надежности смесителей радиосигналов на основе резонансно-туннельных диодов: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 241 с.
11. Vashchenko V. A., Sinkevich V. S. Physical limitations of semiconductor devices. Springer, 2008. 330 p.
12. Irvin J. C. The reliability of GaAs FETs // GaAs FET Principle and Technology. MA: Artech House, 1982.
13. Nagatsuma T., Fujita M., Kaku A., Tsuji D., Nakai S., Tsuruda K., Mukai T. Terahertz Wireless Communications Using Resonant Tunneling Diodes as Transmitters and Receivers // Proc. of Intern. Conf. on Telecomm. and Remote Sensing. Luxembourg, 2014. Vol. 1. P. 41.
14. Srivastava A. Microfabricated Terahertz Vacuum Electron Devices: Technology, Capabilities and Performance Overview // Eur. J. of Adv. in Eng. and Techn. 2015. Vol. 2. P. 54.
15. Баранов И. А., Дудинов К. В., Епифанцев А. А., Замятина Г. А., Коротков А. Н., Короткова И. Ю., Обрезан О. И., Пархоменко В. А. Характеристики деградации монокристаллических схем на GaAs-гетероструктурах при высоких температурах канала pHEMT // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2010. Вып. 1(504). С. 44—53.
16. Linsted R. D., Surty R. J. Steady state junction temperatures of semiconductor chips // IEEE Trans. on Electron Devices. 1972. Vol. ED-19, N 1. P. 41—44.
17. Chou Y. C., Leung D., Lai R., Grundbacher R., Barsky M., Kan Q., Tsai R., Wojtowicz M., Eng D., Tran L., Block T., Liu P. H., Nishimoto M., Oki A. Reliability investigation of 0.07- μm InGaAs-InAlAs-InP HEMT MMICs with pseudomorphic In_{0.75}Ga_{0.25}As channel // IEEE Electron Device Lett. 2003. Vol. 24, N 6. P. 378—380.
18. Ерофеев Е. В., Казимиров А. И., Кагадей В. А. Исследование термостабильности параметров бездрагметалльного GaAs pHEMT транзистора с металлизацией на основе CuGe-соединений // Докл. ТУСУР. 2011. № 2 (24). Ч. 2. С. 41—46.
19. Arykov V. A., Anichenko E. V., Erofeev E. V., Kagadei V. A. 150 nm Copper Metalized GaAs pHEMT with Cu/Ge Ohmic Contacts // Proc. of the 5th Eur. Microwave Integrated Circuits Conf. Paris, 2010. P. 166—169.
20. Cha H. Y., Paek S. W., Lee J. H., Chung K. W., Seo K. S. A Study on PtGeAu Thin Ohmic Contact for GaAs pHEMT // Proc. of CS MANTECH. Vancouver, 1999. P. 67—70.
21. Karbownik P., Barańska A., Szerling A., Macherzyński W., Papis E., Kosiel K., Bugajski M., Tlaczala M., Jakiela R. Low resistance ohmic contacts to n-GaAs for application in GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers // Opt. Appl. 2009. Vol. XXXIX, N 4. P. 655—661.
22. Shin Y.-C., Murakami M., Wilkie E. L., Callegari A. C. Effects of interfacial microstructure on uniformity and thermal stability of AuNiGe ohmic contact to n-type GaAs // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62, N 2. P. 582—590.
23. Stock J., Malindretos J., Indlekofer K.M., Pöttgens M., Förster A., Lüth H. A vertical resonant tunneling transistor for application in digital logic circuits // IEEE Trans. on Electron Devices. 2001. Vol. 48, N 6. P. 1028—1032.
24. Murakai M. Development of refractory ohmic contact materials for gallium arsenide compound semiconductors // Sci. and Techn. of Adv. Mat. 2002. Vol. 3, N 1. P. 1—27.
25. Vidimari F. Improved ohmic properties of Au-Ge contacts to thin n-GaAs layers alloyed with a SiO₂ overlayer // Electronics Letters. 1979. Vol. 15, N 21. P. 674—676.

26. Полевич С. А., Богданов Ю. М., Громов Д. В., Петров М. С., Фёдоров Ю. В., Егоркин В. И. Результаты экспериментального исследования радиационной стойкости GaN СВЧ-переключателя // Тез. 26-й Междунар. конф. „Микроволновые и телекоммуникационные технологии“ (КрыМиКо'2016). Севастополь, 2016. С. 1765—1771.
27. Танеро К. И. Развитие методов расчетно-экспериментального моделирования радиационных эффектов при проектировании и испытаниях радиационно-стойких изделий электронной техники космического применения: Дис. ... докт. техн. наук. Лыткарино: Научно-исследовательский институт приборов, 2017.
28. Мецуров О. В., Танеро К. И. Сравнительные исследования воздействия различных видов ионизирующих излучений на деградацию оптоэлектронных ключей // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: „Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру“. 2011. Вып. 3. С. 41—45.
29. Саркисов С. Ю., Кособуцкий А. В., Брудный В. Н., Каргин Н. Я. Генерация терагерцового излучения от поверхностей узко- и широкозонных полупроводников, модифицированных путем радиационного облучения // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/3. С. 201—203.
30. Брудный В. Н., Кособуцкий А. В., Саркисов С. Ю. Уровень локальной электронейтральности и электронные свойства GaSe под давлением // ФТП. 2010. Т. 44, № 9. С. 1194—1202.
31. Венедитов М. М., Оболенская Е. С., Киселев В. К., Оболенский С. В. Оценка воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты по результатам испытаний ограниченных выборок // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 1. ISSN 1684-1719.
32. Тарасова Е. А. Моделирование радиационной стойкости НЕМТ (обзор) // Вестник ННГУ. 2014. № 1(2). С. 100—115.
33. Тарасова Е. А., Демидова Д. С., Оболенский С. В. и др. InAlAs/InGaAs НЕМТ при облучении квантами высоких энергий // ФТП. 2012. Т. 46, № 12. С. 1587—1592.
34. Оболенский С. В. Физико-топологическое моделирование характеристик субмикронных полевых транзисторов на арсениде галлия с учетом радиационных эффектов: Дис. ... докт. техн. наук. Н. Новгород, 2002.
35. Метелкин И. О., Елесин В. В. Моделирование переходных ионизационных эффектов в полевых транзисторах на арсениде галлия // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2016. Вып. 2(241). С. 10—19.
36. Елесин В. В. Расчетно-экспериментальное моделирование эффектов мощности дозы в СВЧ МИС на основе гетероструктурных полевых транзисторов // Микроэлектроника. 2016. Т. 43, № 2. С. 133—141.
37. Елесин В. В., Чуков Г. В., Громов Д. В., Репин В. В., Вавилов В. А. Исследование влияния ионизирующих излучений на характеристики кремний-германиевых интегральных схем СВЧ диапазона // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 2. С. 136—148.
38. Назарова Г. Н., Елесин В. В., Никифоров А. Ю., Кузнецов А. Г., Усачев Н. А., Амбуркин Д. М. Составные функциональные блоки для создания радиационно-стойких приемо-передающих КМОП КНИ БИС // Микроэлектроника. 2016. Т. 46, № 1. С. 72—80.
39. Шукайло В. П., Оболенский С. В., Басаргина Н. В., Ворожцова И. В., Дубровских С. М., Ткачёв О. В. Люминесценция GaN и GaAs диодов при n-γ-облучении // Вестн. ННГУ. 2012. № 5(1). С. 60—64.
40. Бобыль А. В., Конников С. Г., Устинов В. М., Байдакова М. В., Малеев Н. А., Саксеев Д. А., Конакова Р. В., Миленин В. В., Прокопенко И. В. Радиационно-стимулированная деградация поверхности GaAs и транзисторных структур с высокой подвижностью электронов // ФТП. 2012. Т. 46, № 6. С. 833—844.
41. Mazouz H., Belghachi A., Hadjaj F. Sollar cell degradation by electron irradiation effect of Irradiation fluence // Intern. J. of Phys. and Math. Sci. 2013. Vol. 7, N 12. P. 1718—1720.
42. Jiang M., Xiao H. Y., Peng S. M., Yang G. X., Liu Z. J., Zu X. T. A comparative study of low energy radiation response of AlAs, GaAs and GaAs/AlAs superlattice and the damage effects on their electronic structures // Scientific reports. 2018. N 8, article № 2012 [Электронный ресурс]: <<https://www.nature.com/articles/s41598-018-20155-0>>.
43. Beddiafi Y., Saadoune A., Dehimi L. Numerical simulation of radiation damage on the device performance of GaAs MESFETs // J. of New Techn. and Mat. 2014. Vol. 04, N 01. P. 68—72.
44. El Allam M., Inguibert C., Nuns T., Meulenberg A., Jorio A. et al. Gamma and NIEL dependence of irradiated GaAs // IEEE Trans. on Nuclear Science. 2017. Vol. 64, N 3. P. 991—998.

45. *Wei Q.* Studies of Radiation Hardness of MOS Devices for Application in a Linear Collider Vertex Detector: Doc. Diss. München: Technischen Universität, 2008.
46. *Vaitkus J. V. et al.* Neutron irradiation influence on mobility and compensation of dark conductivity in silicon // *Lith. J. Phys.* 2016. Vol. 56. P. 102—110.
47. *Kazukauskas V., Vaitkus J.-V.* Carrier transport in GaN single crystals and radiation detectors investigated by thermally stimulated spectroscopy // *Opto-Electronics Review.* 2004. Vol. 12, N 4. P. 399—403.
48. *El-Basit W.A. et al.* Computer Modeling, Characterization, and Applications of Gallium Arsenide Gunn Diodes in Radiation Environments // *Nuclear Engineering and Technology.* 2016. Vol. 48. P. 1219—1229.
49. *Myers S. M., Wampler W. R., Modine N. A.* Recombination by band-to-defect tunneling near semiconductor heterojunctions: A theoretical model // *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 120. P. 134502.
50. *Rutherford A.* Electronic effects in radiation damage simulation in metals: PhD. Diss. London Centre of Nanotechnology, University College London, 2009.
51. *Coelho A. V. P., Boudinov H.* Sheet resistance of GaAs conductive layers isolated by proton irradiation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* 2006. Vol. 245. P. 435—439.
52. *Новиков Л. С.* Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2010. 192 с. ISBN 978-5-91304-190-6.
53. *Орлова М. Н., Юрчук С. Ю., Диденко С. И., Таперо К. И.* Изучение деградации фотоэлектрических преобразователей на основе наногетероструктур $A_{III}B_V$ в условиях ионизирующего излучения // *Изв. вузов. Материалы электронной техники.* 2014. Т. 17, № 3. С. 217—223. DOI: 10.17073/1609-3577-2014-3-217-223.
54. *Кольцов Г. И., Диденко С. И., Юрчук С. Ю., Мусалитин Н. А.* Изучение дефектных центров в полупроводниковых соединениях $A_{III}B_V$, образованных при радиационном воздействии и формировании ионно-легированных p — n -структур // *Изв. вузов. Материалы электрон. техники.* 2005. № 3. С. 71—77.
55. *Корольченко А. С., Леготин С. А., Диденко С. И., Кобелева С. П., Орлова М. Н., Мурашев В. Н.* Исследование спектральных и фотоэлектрических параметров высоковольтных многопереходных солнечных батарей // *Изв. вузов. Материалы электрон. техники.* 2010. № 2. С. 50—54.
56. *Комов А. Н., Лизункова Д. А.* Введение в физику полупроводниковой электроники: Учеб. пособие. Самара: Самарский университет, 2015. 156 с.
57. Свид-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018661051, Программный комплекс расчета начального участка вольт-амперных характеристик GaAs/AlGaAs резонансно-туннельных диодов с возможностью проведения машинного статистического эксперимента / *М. О. Макеев, К. В. Черкасов, Ю. А. Иванов, С. А. Мешков.* 2018.

Сведения об авторах

- Кирилл Вячеславович Черкасов** — аспирант; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра радиоэлектронных систем и устройств; E-mail: kvche@mail.ru
- Сергей Анатольевич Мешков** — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра технологий приборостроения; E-mail: sb67241@mail.ru
- Мстислав Олегович Макеев** — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра технологий приборостроения; E-mail: mc.stiv@gmail.com
- Юрий Александрович Иванов** — д-р. физ.-мат наук, профессор; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра технологий приборостроения; E-mail: y-a-ivanov@mail.ru
- Наталья Алексеевна Ветрова** — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра технологий приборостроения; E-mail: natasha_vetrova@mail.ru
- Нина Валентиновна Федоркова** — канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра технологий приборостроения; E-mail: nvf-family@mail.ru

Поступила в редакцию
15.04.19 г.

Ссылка для цитирования: Черкасов К. В., Мешков С. А., Макеев М. О., Иванов Ю. А., Ветрова Н. А., Федоркова Н. В. Моделирование кинетики вольт-амперных характеристик резонансно-туннельных диодов под действием дестабилизирующих факторов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 10. С. 929—940.

MODELING OF RESONANT-TUNNELING DIODES I-V CHARACTERISTICS KINETICS UNDER DESTABILIZING FACTORS INFLUENCE

K. V. Cherkasov, S. A. Meshkov, M. O. Makeev, Yu. A. Ivanov, N. A. Vetrova, N. V. Fedorkova

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia
E-mail: bauman@bmstu.ru

Resonant tunnel diodes (RTD) are promising elements for use in microwave and HF transceivers, in particular, in nonlinear frequency converters of radio signals. The use of RTD as nonlinear elements allows to improve the performance of the converters, as well as to expand the operating frequency range up to terahertz. The kinetics of RTD volt-ampere characteristic at specified operating conditions under the influence of high temperature and ionizing radiation is studied. Mathematical models describing degradation of the RTD volt-ampere characteristic under the effects are developed. The obtained models are used as a basis of a software package that allows to simulate the kinetics of RTD volt-ampere characteristic caused by the action of above factors. The simulation results are compared with experimental data.

Keywords: resonant tunnel diode, kinetic of volt-ampere characteristic, ionizing radiation, high temperature, computer modeling, GaAs/AlGaAs resonant-tunneling heterostructures

REFERENCES

1. Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Fedorenko I.A. et al. *Tekhnika i pribory SVCH*, 2011, no. 2, pp. 1–9. (in Russ.)
2. Vetrova N.A., Meshkov S.A., Ivanov Yu.A., Nazarov V.V., Sinyakin V. Yu., Fedorenko I.A., Fedorkova N.V., Shashurin V.D. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2012, no. 4.
3. Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Shashurin V.D., Fedorkova N.V., Fedorenko I.A. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2010, no. 8(55), pp. 982–988. (in Russ.)
4. Fedorenko I.A., Fedorkova N.V., Shashurin V.D., Ivanov Yu.A. *SVCH-tehnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii (KryMiKo'2011) (Microwave Technology and Telecommunication Technologies (CrimeaMiCo'2011))*, International Crimean Conference, Abstracts of reports, Sevastopol', 2011, pp. 181–182. (in Russ.)
5. Ivanov A.I., Dukach I.A., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Makeyev M.O., Fedorkova N.V. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Proceedings of the International Scientific and Technical Conference)*, Moscow, 2013, no. 3(13), pp. 69–71. (in Russ.)
6. <http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/811.html> (in Russ.)
7. Makeyev M.O., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A. *Nanoinzheneriya*, 2011, no. 4, pp. 44–48. (in Russ.)
8. Esaki L., Tsu R. *IBM J. of R&D*, 1970, no. 1(14), pp. 61–65.
9. Pérez-Álvarez R., Garcia-Mölliner F. *Transfer Matrix, Green Function and Related Techniques: Tools for the Study of Multilayer Heterostructures*, Castelló de la Plana, Publicacions de la Universitat Jaume I, 2004, 285 p.
10. Makeyev M.O. *Razrabotka konstruktorsko-tekhnologicheskikh metodov i sredstv povysheniya nadezhnosti smesiteley radiosignalov na osnove rezonansno-tunnel'nykh diodov (Development of Design and Technological Methods and Means for Improving the Reliability of Radio Signal Mixers Based on Resonant Tunneling Diodes)*, Candidate's thesis, Moscow, 2014, 241 p. (in Russ.)
11. Vashchenko V.A., Sinkovich V.S. *Physical limitations of semiconductor devices*, Springer, 2008, 330 p.
12. Irvin J.C. *The reliability of GaAs FETs in: GaAs FET Principle and Technology*, MA, Artech House, 1982, chapter 6.
13. Nagatsuma T., Fujita M., Kaku A., Tsuji D., Nakai S., Tsuruda K., Mukai T. *Procs. of Intern. Conf. on Telecomm. and Remote Sensing*, Luxembourg, 2014, vol. 1, pp. 41.
14. Srivastava A. *Eur. J. of Adv. in Eng. and Techn.*, 2015, vol. 2, pp. 54.
15. Baranov I.A., Dudinov K.V., Epifantsev A.A., Zamyatina G.A., Korotkov A.N., Korotkova I.Yu., Obrezan O.I., Parkhomenko V.A. *Elektronnaya Tekhnika, Series 1 "SVCH – Tekhnika"*, 2010, no. 1(504), pp. 44–53. (in Russ.)
16. Linsted R.D., Surty R.J. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1972, no. 1(ED-19), pp. 41–44.
17. Chou Y.C., Leung D., Lai R., Grundbacher R., Barsky M., Kan Q., Tsai R., Wojtowicz M., Eng D., Tran L., Block T., Liu P.H., Nishimoto M., Oki A. *IEEE Electron Device Lett.*, 2003, no. 6(24), pp. 378–380.
18. Erofeev E.V., Kazimirov A.I., Kagadey V.A. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2011, no. 2(24), pt. 2, pp. 41–46. (in Russ.)
19. Arykov V.A., Anichenko E.V., Erofeev E.V., Kagadei V.A. *Proc. of the 5th Eur. Microwave Integrated Circuits Conf. Paris*, 2010, pp. 166–169.
20. Cha H.Y., Paek S.W., Lee J.H., Chung K.W., Seo K.S. *Proc. of CS MANTECH*, Vancouver, 1999,

- pp. 67–70.
21. Karbownik P., Barańska A., Szerling A., Macherzyński W., Papis E., Kosiel K., Bugajski M., Tłaczała M., Jakiela R. *Optica Applicata*, 2009, no. 4(XXXIX), pp. 655–661.
 22. Shin Y.-C., Murakami M., Wilkie E.L., Callegari A.C. *J. Appl. Phys.*, 1987, no. 2(62), pp. 582–590.
 23. Stock J., Malindretos J., Indlekofer K.M., Pöttgens M., Förster A., Lüth H. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2001, no. 6(48), pp. 1028–1032.
 24. Murakai M. *Sci. and Techn. of Adv. Mat.*, 2002, no. 1(3), pp. 1–27.
 25. Vidimari F. *Electronics Letters*, 1979, no. 21(15), pp. 674–676.
 26. Polevich S.A., Bogdanov Yu.M., Gromov D.V., Petrov M.S., Fedorov Yu.V., Egorkin V.I. *Mikrovolnovyye i telekommunikatsionnyye tekhnologii (KryMiKo'2016)* (Microwave Technology and Telecommunication Technologies (CrimeaMiCo'2016)), 26th International Conference, Abstracts of reports, Sevastopol', 2016, pp. 1765–1771. (in Russ.)
 27. Tapero K.I. *Razvitiye metodov raschotno-eksperimental'nogo modelirovaniya radiatsionnykh effektov pri proyektirovani i ispytaniyakh radiatsionno-stoykikh izdeliy elektronnoy tekhniki kosmicheskogo primeneniya* (Development of Methods for Calculation and Experimental Modeling of Radiation Effects in the Design and Testing of Radiation-Resistant Products of Electronic Equipment for Space Applications), Doctor's thesis, Lytkarino, 2017. (in Russ.)
 28. Meshchurov O.V., Tapero K.I. *Problems of Atomic Science and Technology, Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, 2011, vol. 3, pp. 41–45. (in Russ.)
 29. Sarkisov S.Yu., Kosobutsky A.V., Brudnyi V.N., Kargin N.Ya. *Russian Physics Journal*, 2013, no. 8/3(56), pp. 201–203. (in Russ.)
 30. Brudnyi V.N., Sarkisov S.Y., Kosobutsky A.V. *Semiconductors*, 2010, no. 9(44), pp. 1158–1166.
 31. Veneditov M.M., Obolenskaya Ye.S., Kiselev V.K., Obolenskiy S.V. *Zhurnal radioelektroniki*, 2017, no. 1. ISSN 1684-1719.
 32. Tarasova E.A. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2014, no. 1(2), pp. 100–115. (in Russ.)
 33. Tarasova E.A., Demidova D.S., Obolenskiy S.V. et al. *Semiconductors*, 2012, no. 12(46), pp. 1587–1592.
 34. Obolenskiy S.V. *Fiziko-topologicheskoye modelirovaniye kharakteristik submikronnykh polevykh tranzistorov na arsenide galliya s uchetom radiatsionnykh effektov* (Physic-Topological Modeling of the Characteristics of Submicron Field-Effect Transistors on Gallium Arsenide Taking into Account Radiation Effects), Doctor's thesis, Nizhni Novgorod, 2002.
 35. Metelkin I.O., Elesin V.V. *Electronic engineering. Series 2. Semiconductor devices*, 2016, no. 2(241), pp. 10–19. (in Russ.)
 36. Elesin V.V. *Russian Microelectronics*, 2016, no. 2(43), pp. 133–141. (in Russ.)
 37. Elesin V.V., Gromov D.V., Chukov G.V., Repin V.V., Vavilov V.A. *Russian Microelectronics*, 2010, no. 2 (39), pp. 136–148.
 38. Nazarova G.N., Elesin V.V., Nikiforov A.Y., Kuznetsov A.G., Usachev N.A., Amburkin D.M. *Russian Microelectronics*, 2016, no. 1(46), pp. 68–76.
 39. Shukaylo V.P., Obolenskiy S.V., Basargina N.V., Vorozhtsova I.V., Dubrovskikh S.M., Tkachev O.V. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2012, no. 5(1), pp. 60–64. (in Russ.)
 40. Bobyl A.V., Konnikov S.G., Ustinov V.M., Baidakova M.V., Maleev N.A., Sakseev D.A., Konakova R.V., Milenin V.V., Prokopenko I.V. *Semiconductors*, 2012, no. 6(46), pp. 814–824.
 41. Mazouz H., Belghachi A., Hadjaj F. *Intern. J. of Phys. and Math. Sci.*, 2013, no. 12(7), pp. 1718–1720.
 42. Jiang M., Xiao H.Y., Peng S.M., Yang G.X., Liu Z.J., Zu X.T. *Scientific reports*, 2018, no. 8, article 2012, <https://www.nature.com/articles/s41598-018-20155-0>
 43. Beddiafi Y., Saadoun A., Dehimi L. *J. of New Techn. and Mat.*, 2014, no. 01(04), pp. 68–72.
 44. El Allam M., Inguibert C., Nuns T., Meulenbergh A., Jorio A. et al. *IEEE Trans. on Nuclear Science*, 2017, no. 3(64), pp. 991–998.
 45. Wei Q. *Studies of Radiation Hardness of MOS Devices for Application in a Linear Collider Vertex Detector*. Doc. Diss. Technischen Universität München, 2008.
 46. Vaitkus J.V. et al. *Lith. J. Phys.*, 2016, vol. 56, pp. 102–110.
 47. Kazukauskas V., Vaitkus J.-V. *Opto-Electronics Review*, 2004, no. 4(12), pp. 399–403.
 48. El-Basit W.A. et al. *Nuclear Engineering and Technology*, 2016, vol. 48, pp. 1219–1229.
 49. Myers S.M., Wampler W.R., Modine N.A. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 120, p. 134502.
 50. Rutherford A. *Electronic effects in radiation damage simulation in metals*. PhD. Diss., London Centre of Nanotechnology University College London, 2009.
 51. Coelho A.V.P., Boudinov H. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2006, vol. 245, pp. 435–439.
 52. Novikov L.S. *Radiatsionnyye vozdeystviya na materialy kosmicheskikh apparatov* (Radiation Effects on Spacecraft Materials), Moscow, 2010, 192 p. ISBN 978-5-91304-190-6. (in Russ.)
 53. Orlova M.N., Yurchuk S.Yu., Didenko S.I., Tapero K.I. *Russian Microelectronics*, 2014, no. 3(17), pp. 217–223. DOI: 10.17073/1609-3577-2014-3-217-223. (in Russ.)
 54. Koltsov G.I., Didenko S.I., Yurchuk S.Yu., Musalitin N.A. *Russian Microelectronics*, 2005, no. 3, pp. 71–77. (in Russ.)
 55. Korol'chenko A.S., Legotin S.A., Didenko S.I., Kobeleva S.P., Orlova M.N., Murashev V.N. *Russian Microelectronics*, 2010, no. 2, pp. 50–54. (in Russ.)
 56. Komov A.N., Lizunkova D.A. *Vvedenie v fiziku poluprovodnikovoi elektroniki* (Introduction to the Physics of Semiconductor Electronics), Samara, 2015, 156 p. (in Russ.)

57. Certificate on the state registration of the computer programs 2018661051, *Programmnyy kompleks rascheta nachal'nogo uchastka vol't-ampernykh kharakteristik GaAs/AlGaAs rezonansno-tunnel'nykh diodov s vozmozhnost'yu provedeniya mashinnogo statisticheskogo eksperimenta* (A Software Package for Calculating the Initial Portion of the Current-Voltage Characteristics of GaAs / AlGaAs Resonant Tunneling Diodes with the Possibility of Conducting a Statistical Experiment), Makeyev M.O., Cherkasov K.V., Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., 2018. (in Russ.)

Data on authors

- Kirill V. Cherkasov** — Post-Graduate Student; Bauman Moscow State Technical University, Department of Radio-Electronic Systems and Devices; E-mail: kvche@mail.ru
- Sergey A. Meshkov** — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Instrument-Making Technologies; E-mail: sb67241@mail.ru
- Mstislav O. Makeev** — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Instrument-Making Technologies; E-mail: mc.stiv@gmail.com
- Yury A. Ivanov** — Dr. Sci., Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Instrument-Making Technologies; E-mail: y-a-ivanov@mail.ru
- Natalia A. Vetrova** — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Instrument-Making Technologies; E-mail: natasha_vetrova@mail.ru
- Nina V. Fedorkova** — PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Instrument-Making Technologies; E-mail: nvf-family@mail.ru

For citation: Cherkasov K. V., Meshkov S. A., Makeev M. O., Ivanov Yu. A., Vetrova N. A., Fedorkova N. V. Modeling of resonant-tunneling diodes I-V characteristics kinetics under destabilizing factors influence. Journal of Instrument Engineering. 2019. Vol. 62, N 10. P. 929—940 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-929-940