

Нелинейно-инерционная модель диода с учетом зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока для повышения качества моделирования РЭА

Г. М. Шевченко^{1,2✉}, Э. В. Семенов^{1,2}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

²Томский государственный университет систем
управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

✉gleb.m.shevchenko@tusur.ru

Аннотация

Введение. Адекватное моделирование полупроводниковых приборов с p – n -переходом в обратном смещении представляет проблему. Существующие квазистатические и неквазистатические модели не в состоянии удовлетворительно охарактеризовать зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от плотности тока. Это приводит к большой погрешности (десятки процентов) моделирования на импульсных широкополосных сигналах. Погрешность моделирования объясняется тем, что в существующих моделях время жизни представлено в виде неизменного значения.

Цель работы. Предложить и исследовать эквивалентную схему p – n -перехода, учитывающую зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока, с возможностью простой интеграции этой схемы в САПР.

Материалы и методы. Исследование выполнено на примере кремниевого быстровосстанавливающегося диода BAS16J с p – n -переходом, производства Nexperia. Предложена модифицированная модель диода в виде эквивалентной схемы, учитывающая зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока p – n -перехода при высоком уровне инжекции.

Результаты. Расхождение между экспериментальной и модельной кривыми не превышает $\pm 9\%$ при импульсном воздействии на диод. Экстракция параметров в предложенной модели происходит обычными способами из вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик диода.

Заключение. Рассмотренная неквазистатическая эквивалентная схема диода представляет большой интерес при проектировании радиоэлектронных устройств, работающих с короткоимпульсными широкополосными сигналами. Представленная модель диода в виде эквивалентной схемы позволяет беспрепятственно реализовать ее в современных САПР на пользовательском уровне.

Ключевые слова: p – n -переход, обратное восстановление, время жизни, диффузионный заряд, неквазистатическая модель

Для цитирования: Шевченко Г. М., Семенов Э. В. Нелинейно-инерционная модель диода с учетом зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока для повышения качества моделирования РЭА // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 70–78. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-70-78

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (проект № FWRM-2021-0015).

Статья поступила в редакцию 05.09.2022; принята к публикации после рецензирования 24.10.2022;
опубликована онлайн 29.12.2022

Nonlinear Inertial Diode Model Considering the Dependence of Nonequilibrium Charge Carrier Lifetime on Direct Current to Improve Simulation of Radioelectronic Equipment

Gleb M. Shevchenko^{1,2✉}, Edward V. Semyonov^{1,2}

¹Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

✉ gleb.m.shevchenko@tusur.ru

Abstract

Introduction. Adequate modeling of semiconductor devices with a p – n -junction in reverse bias represents a relevant research problem. The existing quasistatic and non-quasistatic models fail to provide a satisfactory description for the dependence of nonequilibrium charge carrier lifetime on current density. This leads to significant simulation errors (tens of percent) at pulsed broadband signals. Simulation errors arise, because the existing models regard the lifetime as a constant value.

Aim. To propose and investigate an equivalent circuit of a p – n -junction considering the dependence of the lifetime of nonequilibrium charge carriers on direct current, with the possibility of its simple integration into CAD.

Materials and methods. The study was carried out on the example of a fast recovery silicon diode BAS16J with a p – n -junction manufactured by Nexperia. A modified diode model is proposed in the form of an equivalent circuit that considers the dependence of the lifetime of nonequilibrium charge carriers on the direct current of the p – n -junction at high injection levels.

Results. The discrepancy between the experimental and simulated curves did not exceed ± 9 % under pulsed diode operation. The extraction of parameters in the proposed model is carried out conventionally, from the current-voltage and capacitance-voltage characteristics of the diode.

Conclusion. The proposed non-quasistatic equivalent diode circuit can be used when designing radio electronic devices operated at short-pulse broadband signals. The proposed diode model can be easily implemented in modern CAD systems at the user level.

Keywords: p – n -junction, reverse recovery, lifetime, diffusion charge, non-quasistatic model

For citation: Shevchenko G. M., Semyonov E. V. Nonlinear Inertial Diode Model Considering the Dependence of Nonequilibrium Charge Carrier Lifetime on Direct Current to Improve Simulation of Radioelectronic Equipment. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 6, pp. 70–78. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-70-78

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The work was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the project no. FWRM-2021-0015).

Submitted 05.09.2022; accepted 24.10.2022; published online 29.12.2022

Введение. Моделирование является важным этапом при проектировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Адекватное моделирование минимизирует время и стоимость процесса разработки РЭА, а также позволяет получать достоверные результаты исследования разработанного устройства. При разработке РЭА часто используются полупроводниковые приборы с p – n -переходом, например быстровосстанавливающиеся диоды, диоды с накоплением заряда,

биполярные и IGBT-транзисторы и т. д. Модели полупроводниковых приборов с p – n -переходом могут быть: поведенческие (не отражают физику p – n -перехода), физические и промежуточный вариант – эквивалентные схемы. При моделировании в САПР удобно оперировать эквивалентными схемами. Они учитывают физику работы полупроводника, но на определенном уровне абстракции, а также просты в реализации пользователями САПР.

Динамика процессов в полупроводниковых приборах с p – n -переходом определяется накоплением и рассасыванием неравновесных носителей заряда при переходе из прямого смещения в обратное и наоборот. Рекомбинационные процессы при этом часто играют ключевую роль, а основным параметром, определяющим протекание рекомбинации носителей заряда, является их время жизни τ [1].

На быстроедействие полупроводниковых приборов с p – n -переходом существенным образом влияет динамика времени жизни. Распространенные квазистатические [2, 3] и неквазистатические модели [4–7] не в состоянии удовлетворительно охарактеризовать зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от плотности тока, что приводит к большой погрешности (десятки процентов) моделирования на импульсных сигналах. Погрешность моделирования объясняется тем, что в существующих моделях время жизни имеет неизменное значение. Реализация зависимости времени жизни от прямого тока является актуальной составляющей при проектировании защитных устройств [8–11], генераторов большой мощности, различных усилителей и т. д. [12–14].

Цель настоящей статьи – предложить и исследовать эквивалентную схему p – n -перехода, учитывающую зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока, с возможностью простой интеграции этой схемы в САПР.

Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока диода. Для рекомбинации необходимо одновременное наличие в одной и той же точке кристалла электрона n и дырки p . Исходя из наличия неравновесных (n и p) и равновесных (n_0 и p_0) носителей заряда в p – n -переходе можно определить общую скорость их рекомбинации. Общая скорость изменения количества носителей заряда определяется как разность скоростей рекомбинации и генерации [1]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = \gamma_r (n_0 p_0 - np), \quad (1)$$

где γ_r – коэффициент рекомбинации.

Общая избыточная концентрация носителей заряда определяется как разность в концентра-

циях носителей заряда для равновесного и неравновесного состояний (δ_n – для электронов; δ_p – для дырок). Переписав (1) в соответствии с этим, а также приняв равенство при рекомбинации $\delta_n = \delta_p$, имеем

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = \gamma_r (p_0 + n_0 + \delta_n) \delta_n.$$

Будем рассматривать диод при высоком уровне инжекции, когда количество инжектированных носителей сравнимо с основным легированием. В связи с этим необходимо учитывать избыточную концентрацию электронов δ_n . Тогда постоянная времени жизни неравновесных носителей при высоком уровне инжекции будет иметь вид [1]

$$\tau = \frac{1}{\gamma_r} \frac{1}{p_0 + n_0 + \delta_n} = \frac{1}{\gamma_r (p_0 + n_0)} \times \frac{1}{1 + \delta_n / (p_0 + n_0)} = \tau_0 \frac{1}{1 + \delta_n / (p_0 + n_0)}.$$

При работе с полупроводниковыми приборами уровни легирования часто неизвестны. Поэтому используем модель, основанную на измерениях, предложенную ранее в [15]. Отношение $\delta_n / (p_0 + n_0)$ является линейной функцией тока. Тогда зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока p – n -перехода будет иметь вид [15]

$$\tau(I) = \tau_0 \frac{1}{1 + I/I_0}, \quad (2)$$

где I – ток электропроводности p – n -перехода; I_0 – ток, при котором время жизни уменьшается в два раза.

Использование (2) позволит без затруднений реализовать модель p – n -перехода в современных САПР в виде соответствующей эквивалентной схемы, так как данное уравнение является разрешенным относительно τ , что не требует применения рекурсивных алгоритмов (решение дифференциальных уравнений) [15].

Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда по кривой импульса тока обратного восстановления диода. В качестве примера для экспериментальных измерений используем кремниевый диод с p – n -переходом BAS16J, производства Nexperia. Измерительная установка, используемая ранее [15], также включает в себя генератор

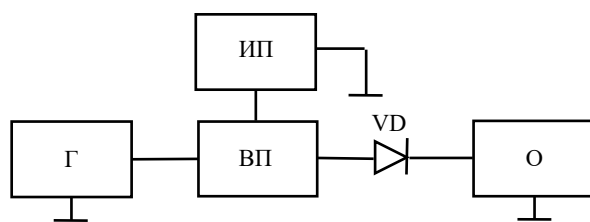


Рис. 1. Функциональная схема измерительной установки

Fig. 1. Functional diagram of the measuring installation

пикосекундных импульсов Pico Technology PG911 (Г), сигнал которого подается на исследуемый диод VD. Прямой ток задается с помощью источника постоянного тока National Instruments PXI-4130 (ИП). Смещение сигнала с генератора происходит за счет втулки питания (ВП). Далее на осциллографе Pico Technology PS 9300 (О) фиксируется сигнал импульса тока обратного восстановления диода. На рис. 1 продемонстрирована функциональная схема измерительной установки [15].

Время жизни τ определяется по кривой обратного восстановления p - n -перехода как отношение диффузионного заряда к прямому току. Диффузионный заряд – это разность между общим и барьерным зарядами p - n -перехода. Общий заряд неосновных носителей вычисляется путем интегрирования кривой (рис. 2) на интервале, где первая и вторая отсчетные точки имеют ток, равный нулю. Барьерный заряд вычисляется путем интегрирования вольт-фарадной характеристики диода. Время жизни составило 180 нс, при прямом токе 15 мА и диффузионном заряде 2.725 нКл. По аналогии выполняется расчет и для других значений токов (см. рис. 6).

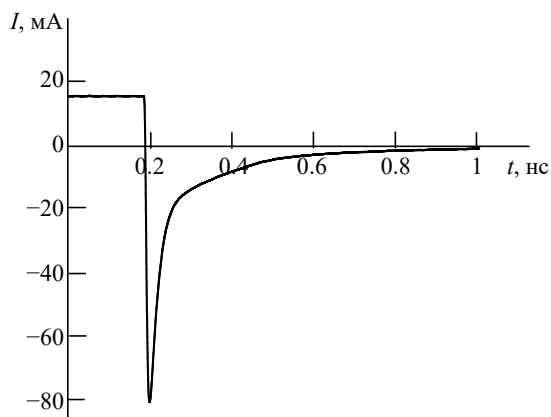


Рис. 2. Импульс тока обратного восстановления диода

Fig. 2. Diode reverse recovery current pulse

SPICE-параметры диода BAS16J
SPICE-parameters of the BAS16J diode

SPICE-параметр	Значение
Ток насыщения (I_s)	3.9 нА
Коэффициент неидеальности ВАХ (N)	1.4
Барьерная емкость (C_{j0})	0.921 пФ
Контактная разность потенциалов (V_j)	0.44 В
Градиентный коэффициент (M)	0.41
Последовательное сопротивление потерь (R_s)	1 Ом

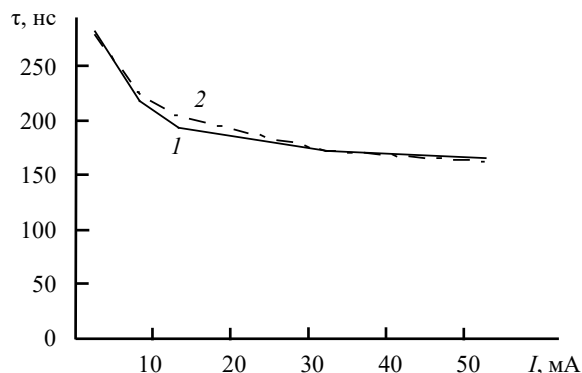


Рис. 3. Сравнение экспериментальной (1) и расчетной (2) зависимостей времени жизни неравновесных носителей заряда

Fig. 3. Comparison of the experimental (1) and calculated (2) dependences of the lifetime of nonequilibrium charge carriers

SPICE-параметры диода BAS16J представлены в таблице.

На рис. 3 продемонстрировано сравнение экспериментальных и расчетных результатов (2) зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока p - n -перехода.

Реализация неквазистатической эквивалентной схемы для режима обратного восстановления диода. На рис. 4 продемонстрирована неквазистатическая эквивалентная схема диода с учетом зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока.

Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока (2) реализована с помощью узла источник напряжения, управляемый током (ИНУТ). Выход узла ИНУТ формирует напряжение, численно равное времени жизни.

Кроме того, в предложенной схеме реализовано неквазистатическое приближение диффузионного заряда. Для отыскания диффузионного заряда будем использовать ранее [10] предложенную формулу

$$Q_d(t) = h(t) * i(t) \tau,$$

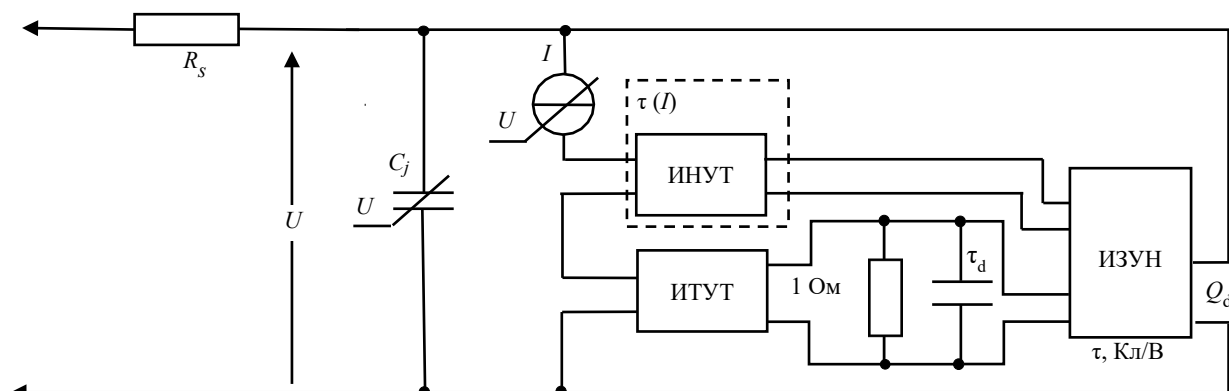


Рис. 4. Неквазистатическая эквивалентная схема диода

Fig. 4. Non-quasistatic equivalent diode circuit

где $h(t)$ – импульсная характеристика, определяющая произвольное линейное преобразование тока электропроводности через диод в заряд неравновесных носителей; * – символ свертки; $i(t)$ – ток электропроводности, описываемый вольт-амперной характеристикой. Эта формула определяет диффузионный заряд в замкнутой, разрешенной относительно диффузионного заряда неквазистатической форме, учитывающей инерцию накопления и релаксации неравновесных носителей заряда.

Для реализации неквазистатического приближения диффузионного заряда эквивалентная электрическая цепь должна иметь импеданс параллельной RC -цепи [16]. В RC -цепи емкость конденсатора численно равна постоянной времени τ_d при $R = 1$ Ом. Параметр τ_d определяет динамику накопления и релаксации неравновесных носителей заряда и определяется вариативным методом путем минимизации невязки экспериментальной и модельной кривых импульса тока обратного восстановления.

Также на рис. 4 обозначено последовательное сопротивление диода R_s и барьерная емкость C_j .

Эквивалентная схема спроектирована с возможностью беспрепятственной ее реализации в распространенных САПР (например, AWR Design Environment). Объясняется это тем, что предложенные элементы имеются во многих библиотеках современных САПР. Узел ИНУТ соответствует CCVS (Current-Controlled Voltage Source), узел ИНУН (источник напряжения, управляемый напряжением) соответствует DYN_VCCS (Dynamic Nonlinear Voltage-Controlled Current/Voltage Source), узел ИТУТ (источник тока, управляемый током) соответствует CCCV (Current-Controlled Current Source), узел ИЗУН (источник заряда, управляемый напряжением) соответствует DYN_VCQS (Dynamic Nonlinear Voltage-Controlled Charge Source).

Однако узел ИЗУН присутствует не во всех популярных САПР (например, CST Studio и Advanced Design System). Поэтому можно использовать последовательные включенные уз-

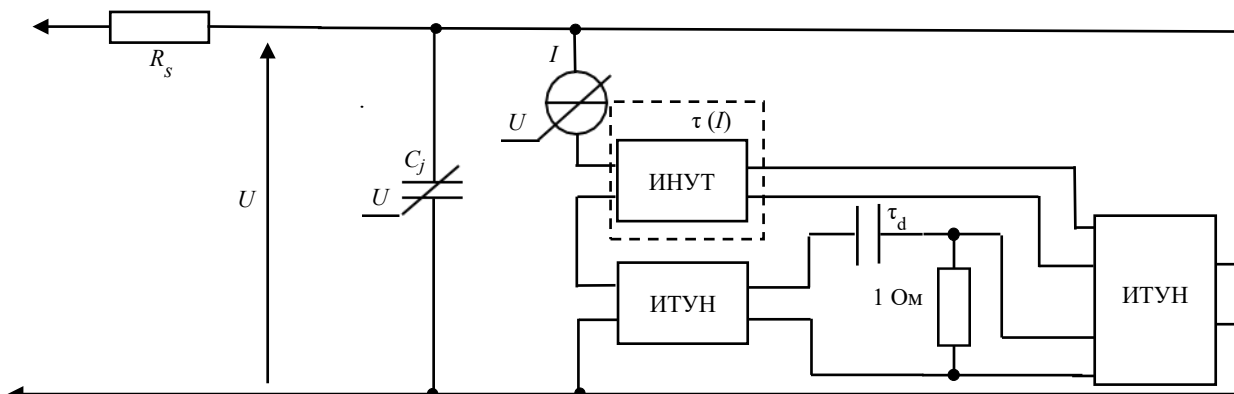


Рис. 5. Неквазистатическая эквивалентная схема диода без ИЗУН

Fig. 5. Non-quasistatic equivalent diode circuit without a voltage-controlled charge source

лы: дифференциальная цепь и ИТУН, а также узел ИТУТ можно заменить на ИТУН. Дифференциальная цепь представляет собой параллельное соединение конденсатора и резистора. Допустимость использования данной связки объясняется тем, что в узле ИЗУН наблюдается изменение заряда. Дифференцируя сигнал с выхода узла ИТУН, получаем сигнал, численно равный заряду. На рис. 5 представлен второй вариант реализации схемы, приведенной на рис. 4.

Анализ полученных результатов моделирования и экспериментальных измерений в режиме обратного восстановления диода. На рис. 6 продемонстрированы экспериментальные и модельные кривые импульса тока обратного восстановления при разном прямом токе.

Рис. 6, б и в наглядно показывает существенное расхождение между экспериментальной и модельной кривыми без учета зависимости времени жизни от прямого тока, в то время как предложенная модель (рис. 4) корректно отрабатывает изменение прямого тока.

Из рис. 6 видно, что невязка между экспериментальной кривой (рис. 5, кривая 1) и предложенной неквазистатической моделью (рис. 6, кривая 2) не превышает $\pm 9\%$. Модель без учета зависимости $\tau(I)$ имеет отклонение от экспериментальной кривой до $\pm 35\%$ (рис. 6, кривая 3).

Также рис. 6 показывает, что при токе 14 мА модель без учета и с учетом зависимости $\tau(I)$ не имеет существенных отклонений от экспериментальной кривой, так как у модели без учета зависимости $\tau(I)$ время жизни рассчитывается при 14 мА. При увеличении прямого тока расхождение модельной кривой без учета зависимости начинает существенно отклоняться от экспериментальной кривой.

Заключение. При проектировании радиоэлектронных устройств на основе полупроводниковых приборов с $p-n$ -переходом у разработчиков возникает потребность в адекватном моделировании для достижения требуемых характеристик реального устройства. Поэтому полезно иметь модели полупроводниковых приборов, которые максимально точно описывают их фактическое поведение. Преимущество этих моделей заключается в минимизации невязки между экспериментальными и модельными кривыми

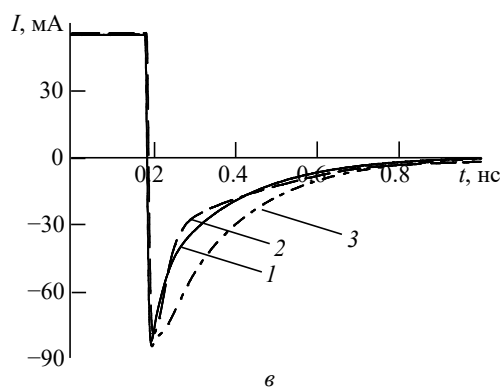
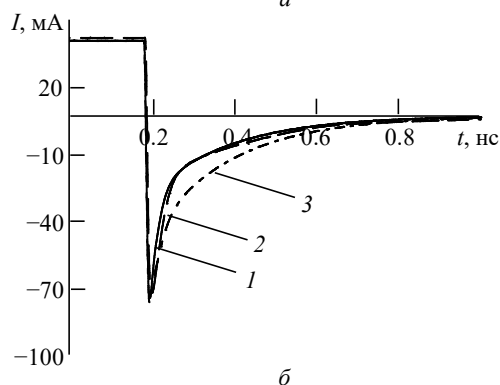
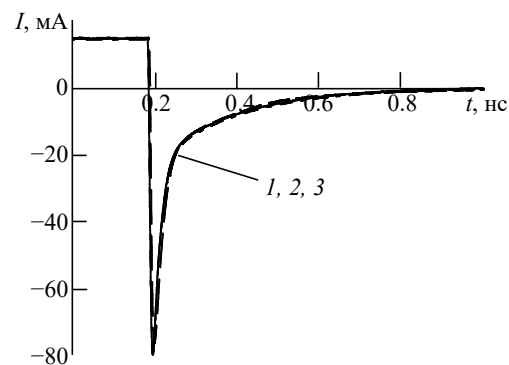


Рис. 6. Импульс тока обратного восстановления на диоде: 1 – эксперимент; 2 – предложенная неквазистатическая модель (см. рис. 2); 3 – стандартная модель (а – 15 мА; б – 34 мА; в – 54 мА)

Fig. 6. Reverse recovery current pulse on the diode: 1 – experiment; 2 – non-quasistatic model (Fig. 2); 3 – standard model (a – 15 mA; б – 34 mA; в – 54 mA)

динамических процессов в обратном смещении.

Существующие квазистатические и неквазистатические модели имеют высокую погрешность моделирования, так как время жизни принимается неизменным. Авторами статьи предложена модифицированная модель времени жизни неравновесных носителей заряда, учитывающая динамику процесса рекомбинации. При этом значение диффузионного заряда рассчитывается в неквазистатическом приближении, учитывающем конечную подвижность неравновесных носите-

лей заряда. Расхождение между экспериментальной и модельной кривыми не превышает $\pm 9\%$.

Представленная модель диода в виде эквивалентной схемы позволяет беспрепятственно

реализовать ее в современных САПР на пользовательском уровне.

Экстракция параметров диода происходит обычными способами из его вольт-амперной и вольт-фарадной характеристик.

Список литературы

1. Тогатов В. В., Гнатюк П. А. Метод измерения времени жизни носителей заряда в базовых областях быстродействующих диодных структур // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39, № 3. С. 378–381.
2. Ayaz M., Shafiqul I, Quazi D. M. Modified Ebers-Moll model of magnetic bipolar transistor // IEEE Intern. Conf. on Electron Devices and Solid-State Circuits, Singapore, 01–04 June 2015. IEEE, 2015. P. 812–815. doi: 10.1109/EDSSC.2015.7285242
3. Ebers J. J., Moll J. L. Large-Signal Behavior of Junction Transistors // Proc. of the IRE. 1954. Vol. 42, № 12. P. 1761–1772. doi: 10.1109/JRPROC.1954.274797
4. Complete Time-Domain Diode Modeling: Application to Off-Chip and On-Chip Protection Devices / B. B. M'Hamed, F. Torres, A. Reineix, P. Hoffmann // Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2011. Vol. 53, № 2. P. 349–365. doi: 10.1109/TEMC.2010.2082551
5. Lauritzen P., Ma C. L. A Simple Diode Model with Reverse Recovery // IEEE Trans. Power Electron. 1991. Vol. 6, № 2. P. 188–191. doi: 10.1109/63.76804
6. Yang A. T., Liu Yu, Yao J. T. An Efficient Non-quasi-Static Diode Model for Circuit Simulation // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 1994. Vol. 13, № 2. P. 231–234. doi: 10.1109/43.259946
7. Tien B., Hu C. Determination of carrier lifetime from rectifier ramp recovery waveform // IEEE Electron Device Lett. 1988. Vol. 9, № 10. P. 553–555. doi: 10.1109/55.17842
8. Лосев Д. В., Бардашов Д. С., Быков А. Г. Возбуждение полупроводникового диода коротким импульсом // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/2. С. 147–150.
9. Айзенштат Г. И., Ющенко А. Ю., Божков В. Г. Переходные процессы в СВЧ-*pin*-диодах на арсениде галлия // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, № 12. С. 14–19.
10. Variable-resolution simulation of nonlinear power circuits / D. Ali, D. Sairja, P. Chapman, J. Jatskevich // Proc. of 2010 IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems. 2010. P. 2750–2753. doi: 10.1109/ISCAS.2010.5537026
11. Modeling and Simulation of Comprehensive Diode Behavior Under Electrostatic Discharge Stresses / H. Li, M. Miao, Yu. Zhou, J. A. Salcedo, J.-J. Hajjar, K. B. Sundaram // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2019. Vol. 19, № 1. P. 2750–2753. doi: 10.1109/TDMR.2018.2882454
12. Разработка и исследование СВЧ-ограничителей мощности на основе *pin*-диодов / А. Ю. Ющенко, Г. И. Айзенштат, Е. А. Монастырев, А. А. Иващенко, А. В. Акимов // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53, № 9-2. С. 315–319.
13. Understanding and Modeling of Diode Voltage Overshoots During Fast Transient ESD Events / P. Zhihao, D. Schroeder, S. Holland, H. K. Wolfgang // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61, № 8. P. 2750–2753. doi: 10.1109/TED.2014.2330365
14. Improvement of SPICE based ESD Protection Models for I/O Protection Modeling / A. Pak, S. M. Mousavi, D. Pommerenke, G. Maghlakelidze, Ya. Xu // IEEE Intern. Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symp. 2021. Vol. 19, № 1. P. 1006–1011. doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559224
15. Шевченко Г. М., Семенов Э. В. Простая модель зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока *p-n*-перехода // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 32-й Междунар. Крымской конф. / под ред. Ю. Б. Гимпилевича, П. П. Ермолова. Севастополь: СевГУ, 2022. С. 7–8.
16. Семенов Э. В., Малаховский О. Ю. Неквазистатическая модель *p-n*-перехода без рекурсии на пользовательском уровне // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 6. С. 151–156.

Информация об авторах

Шевченко Глеб Михайлович – младший научный сотрудник лаборатории нелинейной видеоимпульсной локализации Института сильноточной электроники СО РАН, аспирант Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – синтез нелинейных моделей элементов и устройств для импульсных режимов; нелинейные радиотехнические цепи; нелинейные сверхкороткоимпульсные системы измерений; генераторы высокой мощности. Адрес: Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, д. 2/3, Томск, 634055, Россия E-mail: gleb.m.shevchenko@tusur.ru

Семенов Эдуард Валерьевич – доктор технических наук (2012), доцент (2009), старший научный сотрудник Института сильноточной электроники СО РАН, профессор кафедры радиоэлектроники и систем

связи Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Автор более 160 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – синтез нелинейных моделей элементов и устройств для импульсных режимов; измерение нелинейных искажений сложных сигналов; диагностические и локационные системы с использованием нелинейного отклика на импульсные воздействия.

Адрес: Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, д. 2/3, Томск, 634055, Россия

E-mail: edwardsemyonov@narod.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5470-1185>

References

1. Togatov V. V., Gnatyuk P. A. Method for Measuring the Lifetime of Charge Carriers in the Base Regions of High-Speed Diode Structures. *Physics and Technology of Semiconductors*. 2005, vol. 39, no. 3, pp. 378–381. (In Russ.)
2. Ayaz M., Shafiqul I., Quazi D. M. Modified Ebers-Moll Model of Magnetic Bipolar Transistor. *IEEE Intern. Conf. on Electron Devices and Solid-State. Circuits*, Singapore, 01–04 June 2015. IEEE, 2015, pp. 812–815. doi: 10.1109/EDSSC.2015.7285242
3. Ebers J. J., Moll J. L. Large-Signal Behavior of Junction Transistors. *Proc. of the IRE*. 1954, vol. 42, no. 12, pp. 1761–1772. doi: 10.1109/JRPROC.1954.274797
4. M'Hamed B. B., Torres F., Reineix A., Hoffmann P. Complete Time-Domain Diode Modeling: Application to Off-Chip and On-Chip Protection Devices. *Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2011, vol. 53, no. 2, pp. 349–365. doi: 10.1109/TEMC.2010.2082551
5. Lauritzen P., Ma C. L. A Simple Diode Model with Reverse Recovery. *IEEE Trans. Power Electron*. 1991, vol. 6, no. 2, pp. 188–191. doi: 10.1109/63.76804
6. Yang A. T., Liu Yu, Yao J. T. An Efficient Nonquasi-Static Diode Model for Circuit Simulation. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 1994, vol. 13, no. 2, pp. 231–234. doi: 10.1109/43.259946
7. Tien B., Hu C. Determination of Carrier Lifetime from Rectifier Ramp Recovery Waveform. *IEEE Electron Device Lett*. 1988, vol. 9, no. 10, pp. 553–555. doi: 10.1109/55.17842
8. Losev D. V., Bardashov D. S., Bykov A. G. Excitement of a Semiconductor Diode by a Short Pulse. *Russian Physics J*. 2015, vol. 58, no. 8-2, pp. 147–150. (In Russ.)
9. Aizenshtat G. I., Yushchenko A. Yu., Bozhkov V. G. Transient Processes in Microwave Pin Diodes Based on Gallium Arsenide. *Russian Physics J*. 2014, vol. 57, no. 12, pp. 14–19. (In Russ.)
10. Ali D., Sairja D., Chapman P., Jatskevich J. Variable-Resolution Simulation of Nonlinear Power Circuits. *Proc. of 2010 IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems*. 2010, pp. 2750–2753. doi: 10.1109/ISCAS.2010.5537026
11. Li H., Miao M., Zhou Yu., Selcedo J. A., Hajar J.-J., Sundaram K. B. Modeling and Simulation of Comprehensive Diode Behavior Under Electrostatic Discharge Stresses. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 2750–2753. doi: 10.1109/TDMR.2018.2882454
12. Yushchenko A. Yu., Aizenshtat G. I., Monastyrnev E. A., Ivashchenko A. A., Akimov A. V. Development and Research of Microwave Power Limiters Based on Pin Diodes. *Russian Physics J*. 2010, vol. 53, no. 9-2, pp. 315–319. (In Russ.)
13. Zhihao P., Schroeder D., Holland S., Wolfgang H. K. Understanding and Modeling of Diode Voltage Overshoots During Fast Transient ESD Events. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2014, vol. 61, no. 8, pp. 2750–2753. doi: 10.1109/TED.2014.2330365
14. Pak A., Mousavi S. M., Pommerenke D., Maghlakelidze G., Xu Ya. Improvement of SPICE Based ESD Protection Models for I/O Protection Modeling. *IEEE Intern. Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symp*. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 1006–1011. doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559224
15. Shevchenko G. M., Semyonov E. V. A Simple Model of the Dependence of the Lifetime of Nonequilibrium Charge Carriers on the Direct Current of the p - n -junction. *Microwave Engineering and Telecommunication Technologies: Proc. of the 32nd Intern. Crimean Conf. Ed. by Yu. B. Gimpilevich, P. P. Yermolov. Sevastopol, SevGU, 2022, pp. 7–8. (In Russ.)*
16. Semyonov E. V., Malakhovskij O. Yu. Non-Quasi-Static p - n -junction Model without User-Defined Recursion. *Russian Physics J*. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 151–156. (In Russ.)

Information about the authors

Gleb M. Shevchenko, Junior Researcher at the Laboratory of Nonlinear Video-Pulse Location of the Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Postgraduate Student of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: synthesis of nonlinear models of elements; devices for pulsed modes, non-linear radio engineering circuits; non-linear ultrashort-pulse measurement systems, high power generators.

Address: Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3, Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russia

E-mail: gleb.m.shevchenko@tusur.ru

Edward V. Semyonov, Dr Sci. (Eng.) (2012), Associate Professor (2009), Senior Researcher of Institute of High Current Electronics SB RAS, Professor at the Department of Radioelectronics and Communication Systems of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The author of more than 160 scientific and educational publications. Area of expertise: synthesis of nonlinear models for elements, devices at pulse impacts; measurement of nonlinear distortions of complex signals; diagnostic and radar systems with analysis of nonlinear response to pulse impacts.

Address: Institute of High Current Electronics SB RAS, 2/3, Akademichesky Ave., Tomsk 634055, Russia

E-mail: edwardsemyonov@narod.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5470-1185>
