Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. № 1(15). С. 4-14.
ISSN 2658-3488 print, ISSN 2658-6436 online
Automation and modeling in design and management. 2022. № 1(15). P. 4-14.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 537.9; 621.382
doi:10.30987/2658-6436-2022-1-4-14

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ БЫСТРОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ДИОДОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Константин Александрович Герасимов[1]✉, Олег Олегович Данцев[2], Антон Юрьевич Красюков[3]
[1, 2] ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ, г. Брянск, Россия,
[3] Национальный исследовательский университет «МИЭТ»; г. Зеленоград, г. Москва, Россия
[1] kostyafreeman@yandex.ru
[2] dantsev@sitsemi.ru
[3] a_kras@org.miet.ru

Аннотация. *Выполнен расчет, анализ и верификация вольтамперных характеристик (ВАХ) кремниевого быстровосстанавливающегося диода (БВД) с использованием методов приборно-технологического моделирования. Определены конфигурация планарной структуры кристалла полупроводникового прибора, уровни легирования и дозы облучения высокоэнергетичными частицами, при которых достигаются требуемые значения рабочих и максимальных прямых токов и обратных (пробивных) напряжений. Основными задачами, решению которых посвящена статья, являются задачи определения оптимальных конструктивно-технологических параметров структуры БВД и верификации расчетных значений ВАХ с экспериментальными данными снятых с быстровосстанавливающегося диода SKKE310F12 при различных значениях температуры окружающей среды. Новизна работы представляется полученной верифицированной приборно-технологической моделью БВД, возможной к промышленной реализации в виде полупроводникового устройства на производственной базе отечественных предприятий микроэлектроники. Результаты исследований могут быть использованы при производстве элементной базы силовой электроники для импульсных преобразователей электроэнергии: дискретных БВД, структур БВД в составе силовых модулей на базе МОП и IGBT транзисторов.*

Ключевые слова: приборно-технологическая модель, кристалл, планарная структура, температура, ВАХ, пробой, охранные кольца

Для цитирования: Герасимов К. А., Данцев О. О., Красюков А. Ю. Автоматизированный расчет статических характеристик кремниевых быстровосстанавливающихся диодов для применения в устройствах силовой электроники // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1 (15). С. 3-14. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-4-14.

Original article
Open Access Article

AUTOMATED CALCULATION OF STATIC CHARACTERISTICS OF SILICON FAST RECOVERY DIODES FOR APPLYING IN POWER ELECTRONICS DEVICES

Konstantin A. Gerasimov[1]✉, Oleg O. Dantsev[2], Anton Yu. Krasyukov[3]

 © Герасимов К. А., Данцев О. О., Красюков А. Ю., 2022

[1, 2] «Silicon El» group, Bryansk, Russia
[3] National Research University of Electronic Technology «MIET»; Zelenograd, Moscow, Russia
[1] kostyafreeman@yandex.ru
[2] dantsev@sitsemi.ru
[3] a_kras@org.miet.ru

Abstract. *Calculating, analysing and verifying current-voltage characteristics (CVC) of a silicon fast-recovery diode (FRD) are performed using the methods of instrumental-technological modelling. The article determines the planar structure configuration of a semiconductor device crystal, the levels of doping and doses of irradiation with high-energy particles, at which the required values of operating and maximum forward currents and reverse (breakdown) voltages are achieved. The main tasks to be solved in the article are to determine the optimal design and technological parameters of the fast-recovery diode (FRD) structure and verifying the calculated current-voltage characteristics (CVC) values with the experimental data taken from the SKKE310F12 fast recovery diode at various ambient temperatures. The novelty of the work is represented by the obtained verified instrumental-technological model of FRD, which is possible for industrial implementation in the form of a semiconductor device at the production base of domestic microelectronics enterprises. The results of the research can be used in producing the element base of power electronics for pulsed power converters, namely discrete FRD, FRD structures as part of power modules based on MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) and IGBT transistors.*

Keywords: instrumental-technological model, crystal, planar structure, temperature, CVC, breakdown, guard rings

For citation: Gerasimov K. A., Dantsev O. O., Krasyukov A. Yu. Automated calculation of static characteristics of silicon fast recovery diodes for applying in power electronics devices. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 1 (15). pp. 3-14. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-4-14.

Введение

Быстровосстанавливающиеся диоды способны коммутировать прямой ток и блокировать обратное напряжение на высоких частотах, исчисляемых десятками и сотнями килогерц.

Планарная структура БВД представляет собой *p*-*i*-*n*-диод [7], т.е. структура имеет промежуточную область «*i*» с гораздо более низкой степенью легирования, чем окружающие ее *p*- и *n*- слои. В БВД, изготовленных на основе кремния, для повышения быстродействия время жизни носителей заряда в среднем низколегированном *i*-слое снижено до определенного значения. Толщина «*i*» области, размеры основного *p*-*n*-перехода, а также охранная система должны быть рассчитаны таким образом, чтобы выдерживать обратное напряжение пробоя величиной не менее 1200 В и обеспечить прямой ток на уровне не ниже 150 А.

Быстровосстанавливающиеся диоды также используются в качестве элементной базы управляемых полупроводниковых ключей силовых модулей – *IGBT*, МОП и т.п. [2, 10, 11]. Требования к таким БВД (т.е. диодам, согласованным с *IGBT*, МОП для сборки в один модуль) жесткие и технологически трудновыполнимые. Они должны соответствовать быстродействию полупроводниковых транзисторных ключей и должны иметь оптимальное сочетание статических и динамических параметров. Кроме того, БВД должны обеспечивать мягкий характер обратного восстановления в широком диапазоне рабочих температур, а также быть способными выдерживать резкие изменения тока при коммутации индуктивной нагрузки.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Для реализации поставленной цели была разработана приборно-технологическая модель БВД, эскиз планарной структуры которой представлен на рис. 1. Размеры областей БВД и параметры структуры подбирались таким образом, чтобы их впоследствии можно было реализовать, используя имеющееся технологическое оборудование. Результаты расчетов сопоставлялись с результатами экспериментальных исследований реального БВД SKKE310F12 [5] фирмы Semikron.

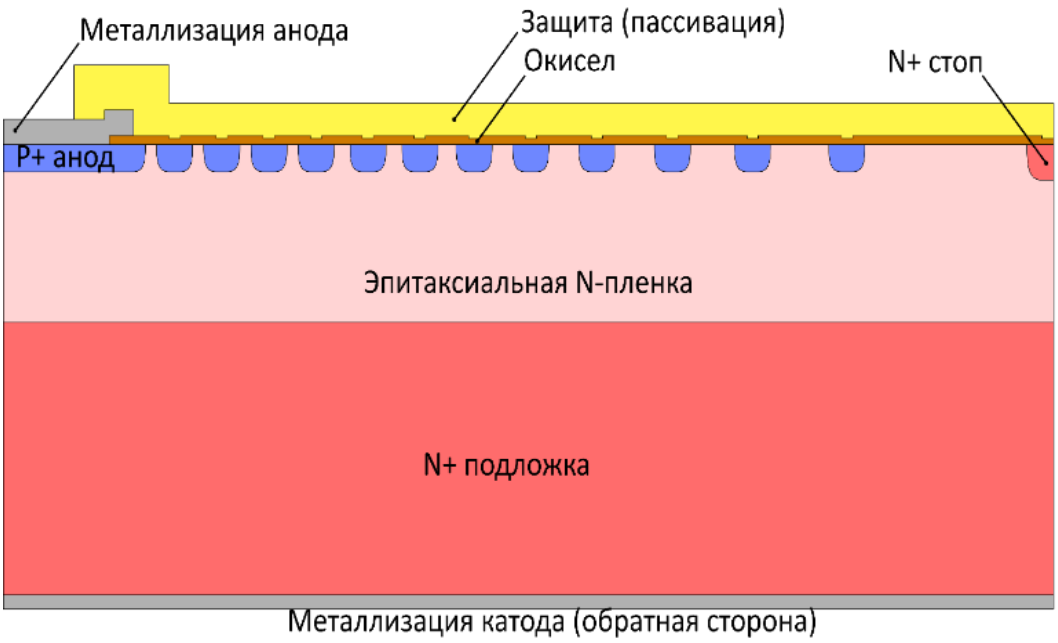


Рис. 1. Эскиз планарной структура быстровосстанавливающегося диода (БВД)
Fig. 1. Sketch of the planar structure of a fast recovery diode (FRD)

Расчет характеристик предлагаемой структуры БВД осуществлялся с использованием возможностей системы автоматизированного технологического проектирования Synopsys Sentaurus TCAD [1, 3, 4, 8, 9], с помощью которой возможны исследования статических и динамических характеристик, влияние на характеристики модели прибора низких и высоких температур, оценка влияния на характеристики высокоэнергетического излучения и многое другое.

Представленная в статье модель БВД предназначена для расчета прямых и обратных ВАХ силового кремниевого прибора при температурах окружающей среды в диапазоне от - 47 °С до + 85 °С. В модели сформирован комбинированный профиль с пиком центров рекомбинации в области анода и с равномерным распределением в области катода. Модель представлена в виде проекта TCAD SWB и содержит описание структуры, методов моделирования, информацию о выбранных численных решателях и т.п. для следующих модулей TCAD: SDE, Sdevice, Svisual [6].

Модуль SDE применяется для формирования геометрии структуры и задания концентрационных профилей. Модуль Sdevice производит расчет ВАХ с заданными физическими моделями. Модуль Svisual визуализирует результат расчета и выводит значения электрофизических параметров, прямого или обратного падения напряжения на диоде при различных значениях прямого тока и внешней температуры. Отметим, что для удобства получения ВАХ были разработаны отдельные приборно-технологические модели БВД, отражающие его работу при прямом и при обратном включениях. Модель для расчета прямой ВАХ представлена в формате классической трехслойной *p-i-n*-структуры. Модель для расчета обратной ВАХ включает в себя охранные структуры в виде набора охранных колец, позволяющих увеличить до требуемого значения уровень обратного напряжения диода.

В табл. 1 представлены параметры технологических слоев разработанной модели полупроводниковой структуры БВД для расчета прямых ВАХ, которые использовались в модуле SDE. В табл. 2 представлены параметры модели для расчетного модуля Sdevice. Физические модели, используемые для расчета ВАХ полупроводникового прибора представлены в табл. 3.

Таблица 1

Параметры геометрии БВД, задаваемые в модуле SDE для расчета прямых ВАХ

Table 1

FRD geometry parameters configured in the SDE module for calculating forward current-voltage characteristics (CVCs)

Наименование параметра	Ед. измерения	Обозначение параметра в TCAD	Значение параметра
Концентрация примеси (фосфора) в подложке	$см^{-3}$	*SUB_dop*	$2 \cdot 10^{19}$
Концентрация примеси (фосфора) в эпитаксиальной пленке	$см^{-3}$	*EPI_dop*	$0{,}55 \cdot 10^{14}$
Толщина эпитаксиальной пленки	мкм	*EPI_h*	110
Общая толщина структуры	мкм	*EPI+SUB_h*	230
Ширина области перехода значения времени жизни в аноде к значению вблизи *pn*-перехода	мкм	*Transit_WL*	13,0
Ширина области перехода значения времени жизни вблизи *pn*-перехода к значению в катоде	мкм	*Transit_WR*	2,5
Глубина залегания пика центров рекомбинации	мкм	*Transit_Y*	16,4
Максимальное время жизни электронов (*tau*max) в аноде	с	*Anode_LT*	$0{,}005 \cdot 10^{-6}$
Максимальное время жизни электронов (*tau*max) в области *pn*-перехода	с	*pn_LT*	$0{,}00087 \cdot 10^{-6}$
Максимальное время жизни электронов (*tau*max) в катоде	с	*Cathode_LT*	$0{,}101 \cdot 10^{-6}$
Отношение времени жизни электронов и дырок в области анода	digit	*LowRatio*	2,5
Отношение времени жизни электронов и дырок в области *pn*-перехода и катода	digit	*HighRatio*	2,5

Таблица 2

Параметры для структуры БВД, задаваемые в модуле Sdevice

Table 2

Parameters for the FRD structure, set in the Sdevice module

Наименование параметра	Ед. измерения	Обозначение параметра в TCAD	Значение параметра
Параметр используется для учета активной площади диода (*pn*-перехода). Ширина модели составляет 10 мкм, поэтому параметр можно рассчитать по следующей формуле: *AreaFactor* = *S*/10, где *S* – площадь *pn*-перехода диода в мкм.	мкм	*AreaFactor*	$32{,}0 \cdot 10^{6}$
Решатель используемый для расчета обратной ВАХ. Доступны следующие решатели: Super, Pardiso, ILS. Pardiso и ILS являются многопоточными.	Solver Name	*Solver*	*ILS*
Число потоков для расчета. Зависит от используемого процессора. В случае использования решателя Super данный параметр игнорируется	Integer	*Threads*	8
Прямое напряжение, до которого происходит расчет характеристики диода	В	*VF*	2,5
Температура окружающей среды	К	*Temp*	358, 298, 226

Таблица 3

Физические модели, используемые для расчета ВАХ

Table 3

Physical models used to calculate CVCs

Модель	Физический эффект
IncompleteIonization	Неполная ионизация примесей при низких температурах
EffectiveIntrinsicDensity BandGapNarrowing (Slotboom)	Зависимость ширины запрещенной зоны от концентрации примесей
DopingDependence(PhuMob2)	Зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примесей. Унифицированная модель подвижности Philips описывает взаимодействие объемных подвижностей основных и неосновных носителей заряда. Модель учитывает температурную зависимость подвижности, электронно-дырочное рассеяние, экранирование ионизованных примесей носителями заряда и кластеризацию примесей.
SRH (DopingDependence ExpTempDependence)	Зависимость времени жизни (рекомбинации ШРХ) от концентрации примесей моделируется с помощью соотношения Шарфеттера. Зависимость от температуры – по экспоненциальной модели (время жизни падает с уменьшением температуры).
HighFieldSaturation	В сильных электрических полях дрейфовая скорость носителей заряда не пропорциональна электрическому полю, вместо этого скорость насыщается до конечного значения v_{sat}. Модель Canali вычисляет конечную подвижность μ как функцию подвижности в слабом поле μ_{low} и движущей силы (GradQuasiFermi).
Auger	Оже-рекомбинация

Результаты

После запуска модуля SDE создается геометрия структуры полупроводникового прибора для расчета прямых и обратных ВАХ с требуемыми концентрационными профилями (рис. 2, рис. 3). Информация о созданной геометрии полупроводникового прибора и его концентрационный профиль далее передаются для расчета ВАХ в модуль Sdevice. Расчет осуществляется методом численного решения фундаментальной системы уравнения полупроводников путем наложения на структуру расчетной сетки, шаг которой снижается вблизи границ *p-n*-переходов и увеличивается при отдалении от них.

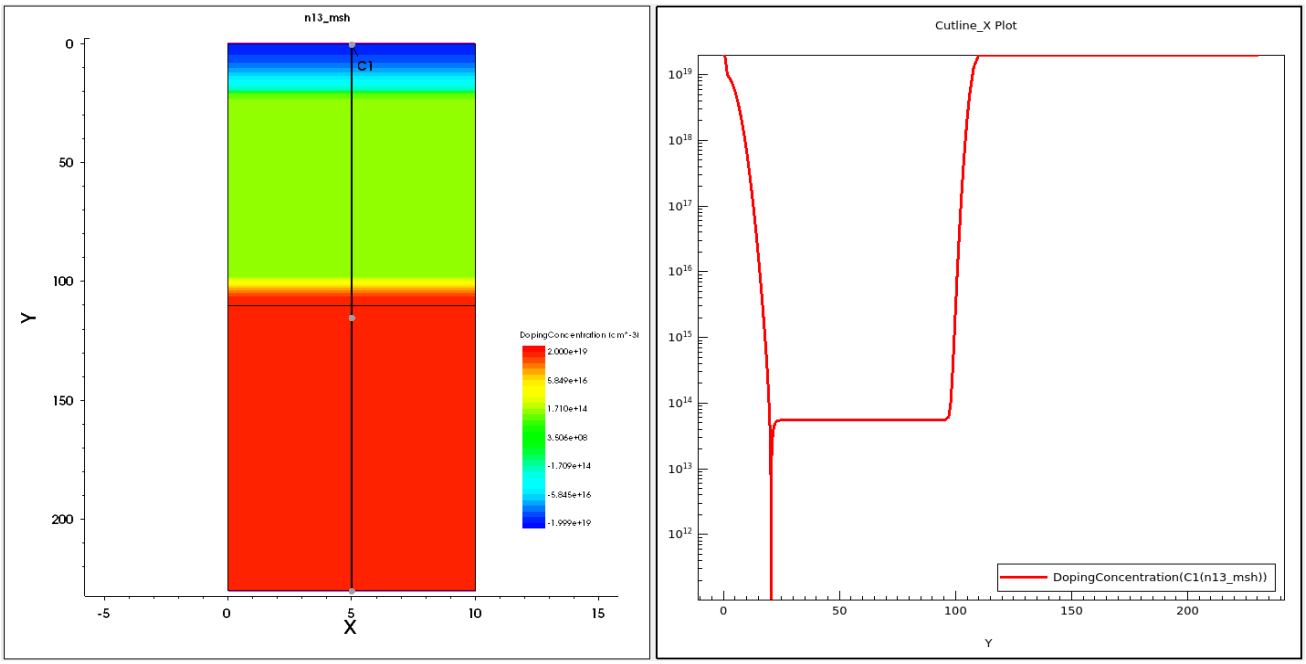


Рис. 2. Структура модели БВД и концентрационный профиль для расчета прямых ВАХ
Fig. 2. The structure of the FRD model and the concentration profile for calculating direct CVCs

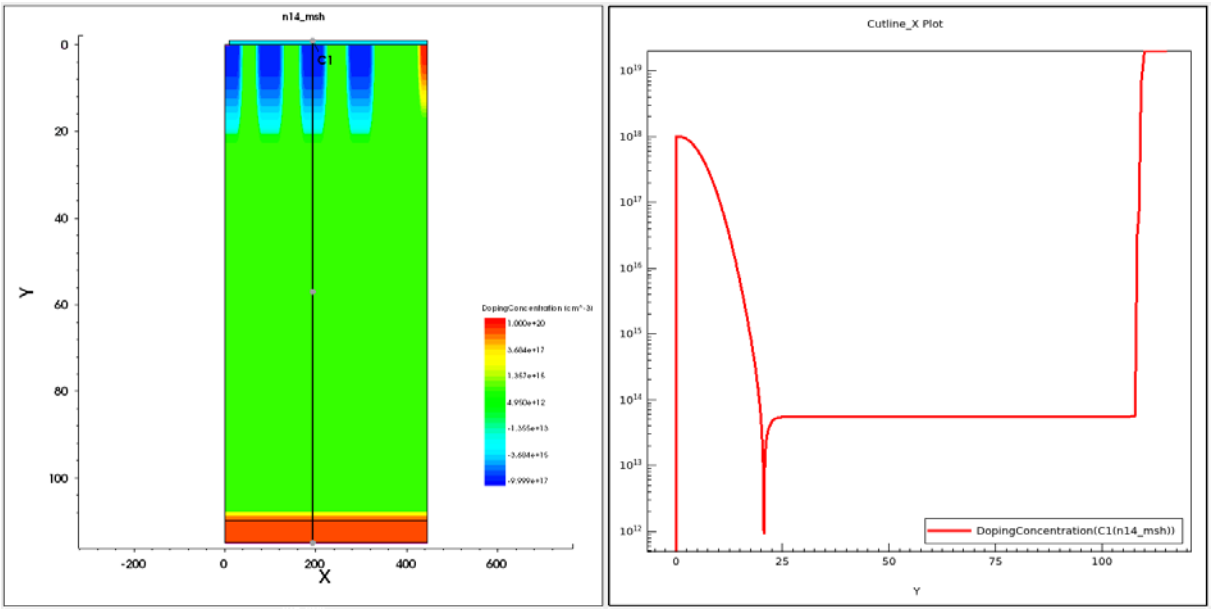


Рис. 3. Структура модели БВД и концентрационный профиль для расчета обратных ВАХ
Fig. 3. The structure of the FRD model and the concentration profile for calculating the revers CVCs

Результаты рассчета и эксперимента прямых ВАХ, а также результаты расчета обратных ВАХ представлены на рис. 4, 5. Сопоставляя рассчитанные значения прямых ВАХ с экспериментальными данными, полученными при температуре окружающей среды 25 °С (298 К), а также при температуре - 47 °С (226 К) можно сделать вывод об адекватности характеристик разработанной приборно-технологической модели быстровосстанавливающегося диода (рис. 6).

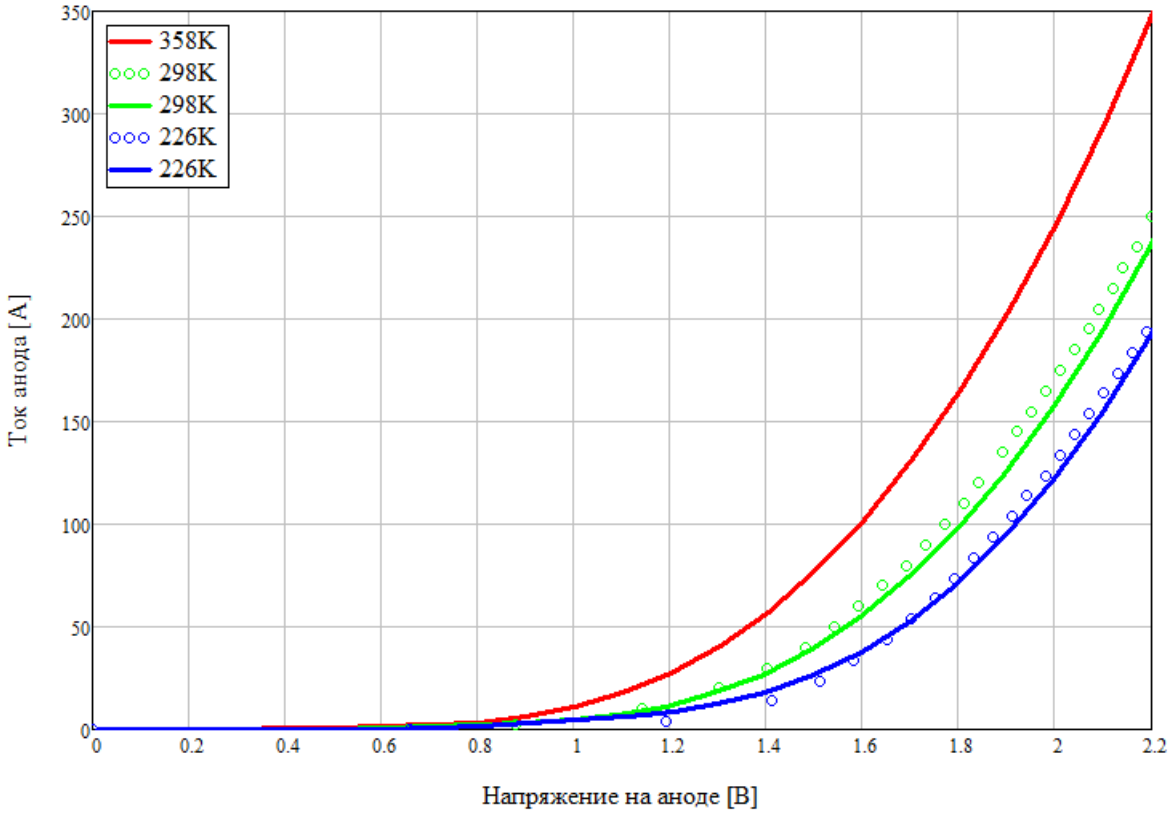


Рис. 4. Прямые ВАХ БВД: расчетные значения – жирные линии, эксперимент – кружки
Fig. 4. Direct CVCs of the FRD: calculated values are thick lines, experiment is circles

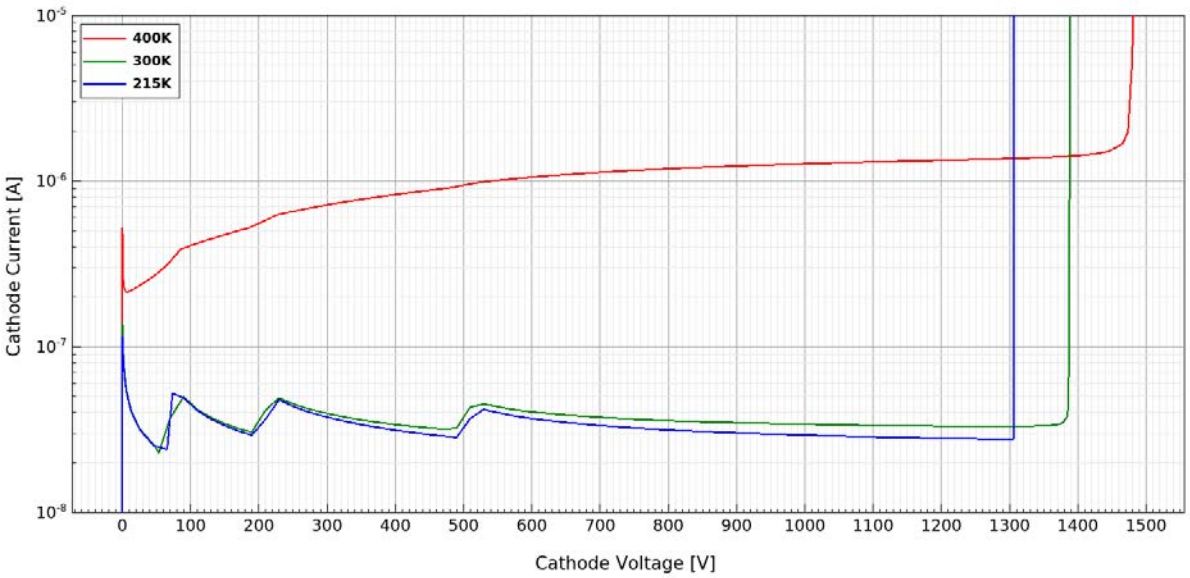


Рис. 5. Обратные ВАХ БВД
Fig. 5. Reverse CVCs FRD

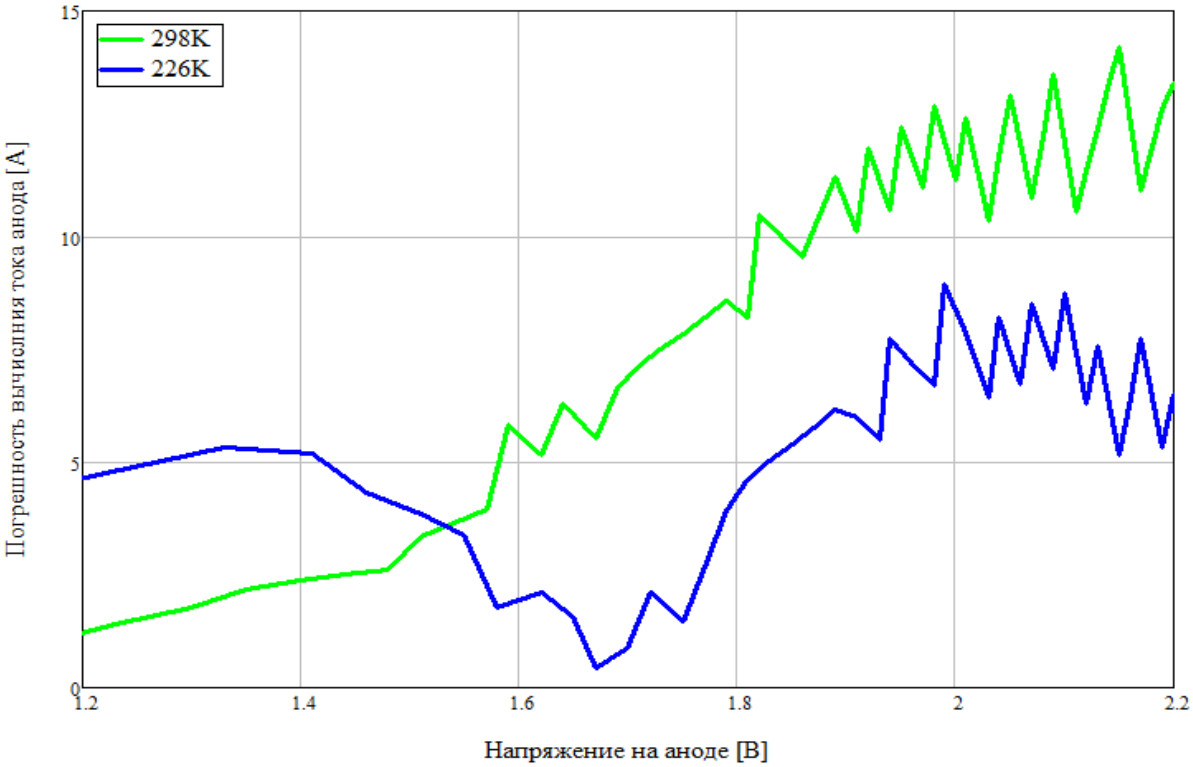
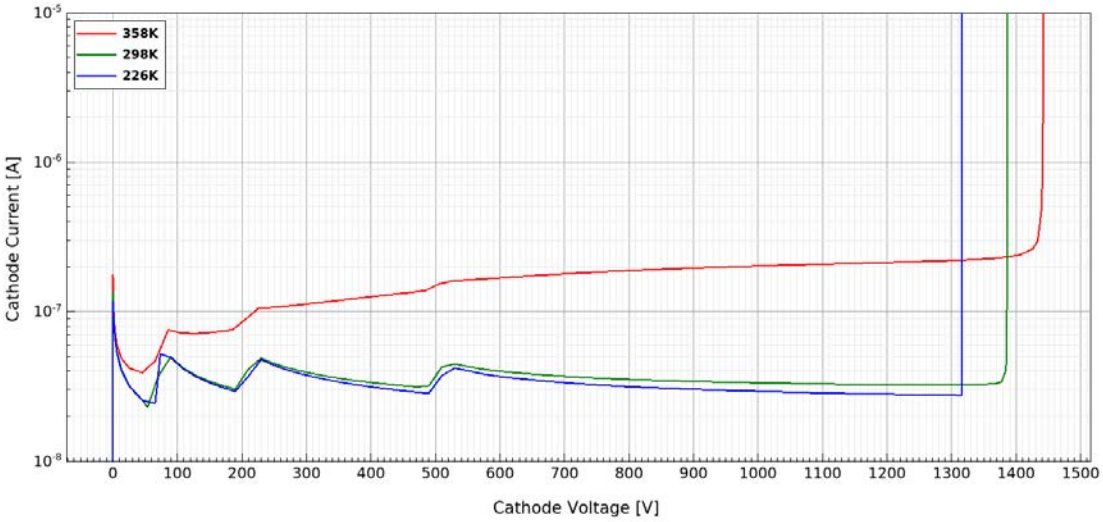


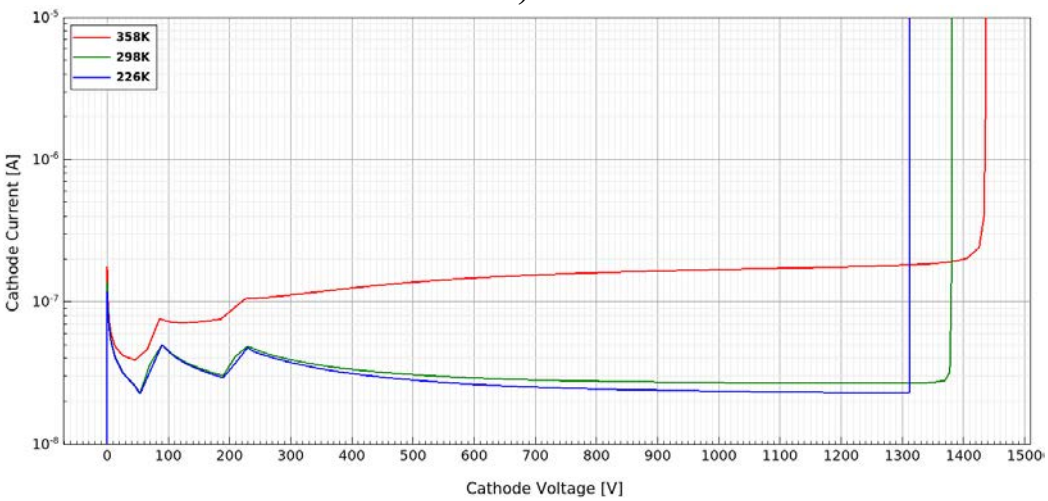
Рис. 6. Абсолютная погрешность расчета значений прямой ВАХ БВД
Fig. 6. Absolute error of the calculated values of the direct CVCs of FRD

Как видно из рис. 6, погрешность расчета прямых ВАХ в сопоставлении с результатами экспериментов в зоне выхода ВАХ в диапазон рабочих токов БВД не превышает 14 % для температуры окружающей среды 25 °С (298 К) и 8 % для температуры - 47 °С (226 К).

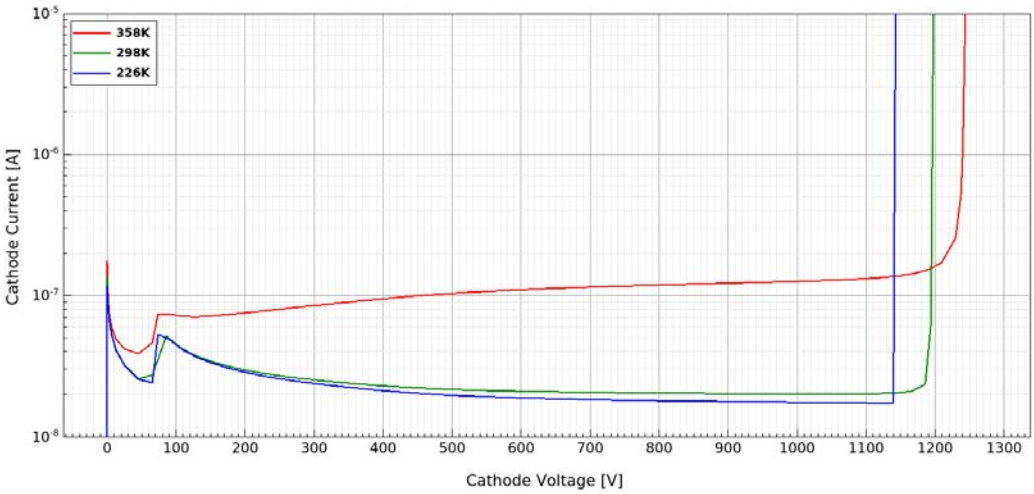
С целью выяснения оптимального количества охранных колец для обеспечения пробивного напряжения на уровне не менее 1200 В во всем температурном диапазоне проведены вычислительные эксперименты по влиянию их количества на величину пробивного напряжения (рис. 7). Это важно с точки зрения оптимизации площади кристалла БВД, чем меньше колец, тем меньше площади кристалла они займут, что особенно важно для кристаллов, рассчитанных на небольшие значения токов.



а)



б)



в)

Рис. 7. Обратные ВАХ БВД:
а – 3 охранных кольца; *б* – 2 охранных кольца; *в* – 1 охранное кольцо
Fig. 7. Reverse CVCs of FRD:
a – 3 guard rings; b – 2 guard rings; c – 1 guard ring

Дополнительно определены наиболее уязвимые места к пробою в структуре БВД, которые можно определить по плотности распределения напряженности электрического поля. На рис. 8 представлены карты распределения напряженности поля структуры БВД при

разном количестве охранных колец. Карты построены при температуре окружающей среды 25 °С (298 К).

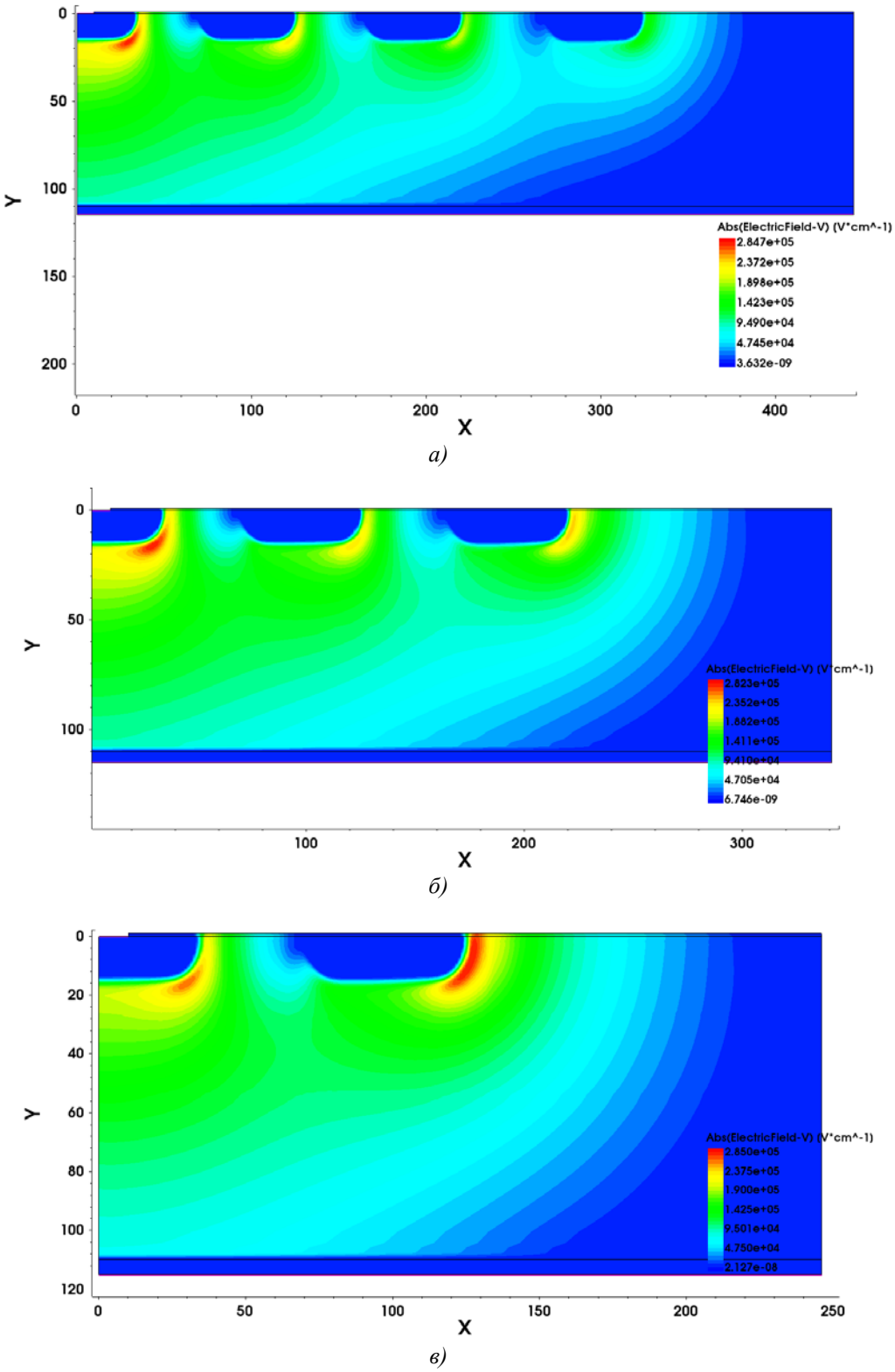


Рис. 8. Карта распределения напряженности электрического поля при пробое БВД:
а – 3 охранных кольца; *б* – 2 охранных кольца; *в* – 1 охранное кольцо
Fig. 8. Distribution map of the electric field strength during the breakdown of the FRD:
a – 3 guard rings; b – 2 guard rings; c – 1 guard ring

Для структуры с тремя и двумя охранными кольцами лавинный пробой происходит в области рабочего *p-n*-перехода. При этом ток протекает преимущественно в вертикальном

направлении. Этот процесс говорит о том, что дальнейшее повышение напряжения пробоя невозможно, т.к. оно ограничено параметрами эпитаксиальной пленки – толщиной и удельным сопротивлением.

Также можно утверждать, что увеличение количества охранных колец выше 2-х нецелесообразно, т.к. уже достигнуто достаточное расширение области пространственного заряда, при котором пробой не происходит в охранной области (на одном из колец), как это можно наблюдать из рис. 8, *б* при пробое структуры с одним охранным кольцом.

Заключение

В данной работе рассмотрен результат автоматизированного способа разработки приборно-технологической модели быстровосстанавливающегося диода в САПР Synopsys Sentaurus TCAD в виде расчета его основных статические характеристик при трех значениях температуры окружающей среды 85 °С (358 К), 25 °С (298 К), - 47 °С (226 К). Определено оптимальное количество охранных колец, обеспечивающих пробивное напряжение диода на уровне не ниже 1200 В.

В результате проведенной разработки и моделирования:

– получены результаты расчета прямых ВАХ БВД;

– получены результаты расчета обратных ВАХ БВД;

– установлено, что основной вклад в вид прямых ВАХ БВД вносят концентрационные профили структуры, а также режимы ее облучения для получения требуемого профиля времени жизни;

– достигнуты показатели по верификации результатов моделирования и экспериментально полученных прямых ВАХ на уровне абсолютной ошибки не более 14 % для температуры окружающей среды 25 °С (298 К) и 8 % для температуры - 47 °С (226 К);

– предложены структуры для БВД, обеспечивающие пробой при напряжении не менее 1200 В;

– рассчитаны распределения напряженностей электрического поля БВД для трех вариантов охранных колец;

– определено оптимальное количество охранных колец для структуры рассматриваемого БВД, обеспечивающих уровень пробивного напряжения не ниже 1200 В во всем диапазоне температур – 2 кольца.

Список источников:

1. **Глушко, А.А.** Приборно-технологическое моделирование в системе TCAD Sentaurus : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Автоматизация проектирования электронных средств» / А.А. Глушко. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 61 с.
2. **Громов, В.И** Конструктивно-технологические особенности эмиттера быстро восстанавливающихся диодов с мягким восстановлением / В.И. Громов [и др.] // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – №6 (72). – С. 82-83.
3. **Индришенок, В.И.** Основы приборно-технологического моделирования в Sentaurus TCAD [Электронный ресурс] / В.И. Индришенок. – М: Московский технологический университет (МИРЭА), 2018. – 118 с.
4. **Pribytny, P.** TCAD simulation methodology for full 3D electro-physical and advanced thermal analysis of power modules / P. Pribytny [et al.] // 2017 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). – Kamakura, Japan: IEEE, 2017. – С. 249-252.
5. **SKKE** 310F12. – SEMIKRON [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

References:

1. Glushko A.A. Instrument-Technological Modelling in the TCAD Sentaurus System: Methodical Instructions to Performance of Laboratory Works on Discipline «Automation of Design of Electronic Means». Moscow: BMSTU Publ., 2015, 61 p.
2. Gromov V.I. et al. Structural and Technological Features of the Emitter of Fast Recovery Diodes with Soft Recovery. Electronics: Science, Technology, Business, 2006, no. 6 (72), pp. 82-83.
3. Indrishenok V.I. Fundamentals of Instrument-Technological Modelling in Sentaurus TCAD. Moscow: Moscow Technological University (MIREA), 2018, 118 p.
4. Pribytny P. et al. TCAD Simulation Methodology for Full 3D Electro-Physical and Advanced Thermal Analysis of Power Modules. International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). Kamakura, Japan: IEEE, 2017, pp. 249-252.
5. SKKE 310F12. – SEMIKRON. Available at: https://www.semikron.com/products/product-

https://www.semikron.com/products/product-classes/thyristordiode-modules/detail/skke-310f12-07910520.html.
6. **TCAD –** Technology Computer Aided Design (TCAD). – Synopsys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html.
7. Ахмелкин, Д.М. Кремниевые *pin*-диоды для мощных СВЧ-устройств *L*- и *S*-диапазонов / Д.М. Ахмелкин, А.В. Ботов // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13. – №S4 (99).
8. **Медведев, Д.М**. Моделирование вольт-амперных характеристик LDD MOS транзистора при криогенной температуре / Д. М. Медведев, А. А. Малаханов // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, Брянск, 22-23 октября 2020 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 390-393. – DOI: 10.51932/9785907271739_390.
9**. Медведев, Д.М.** Моделирование высоковольтного кремниевого диода Шоттки / Д.М. Медведев, А.А. Малаханов // САПР и моделирование в современной электронике: Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции, Брянск, 21-22 октября 2021 года. – Брянск: Новый формат, 2021. – С. 285-288. – DOI: 10.30987/conferencearticle_61c997f09d8527.44162014.9.
10. **Baliga, B.J.** Fundamentals of Power Semiconductor Devices / B.J. Baliga. – Cham: Springer International Publishing, 2019.
11. **Lutz, J.** Semiconductor Power Devices / J. Lutz [et al.]. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

classes/thyristordiode-modules/detail/skke-310f12-07910520.html.
6. TCAD – Technology Computer Aided Design (TCAD). – Synopsys. Available at: https://www.synopsys.com/silicon/tcad.html.
7. Akhmelkin D.M., Botov A.V. Silicon *Pin*-Diodes for High-Power Microwave Devices of *L*- and *S*-Bands. Nanoindustry, 2020, vol. 13, no. S4 (99).
8. Medvedev D.M., Malakhanov A.A. Modelling the Current-Voltage Characteristics of an *LDD MOS* Transistor at Cryogenic Temperature. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference «CAD and Modelling in Modern Electronics», October 22-23, 2020. Bryansk: Bryansk State Technical University, 2020, pp. 390-393. DOI: 10.51932/9785907271739_390.
9. Medvedev D.M., Malakhanov A.A. Simulation of a High-Voltage Silicon Schottky diode. Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «CAD and Modelling in Modern Electronics», October 21-22, 2021, Bryansk: Novyy format, 2021, pp. 285-288. DOI: 10.30987/conferencearticle_61c997f09d8527.44162014.9.
10. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. Cham: Springer International Publishing, 2019.
11. Lutz J. et al. Semiconductor Power Devices. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

Информация об авторах

Константин Александрович Герасимов
инженер-технолог, тел.: +7-910-230-09-83

Олег Олегович Данцев
Начальник дизайн-центра управления развития, тел.: +7-4832-41-48-85.

Антон Юрьевич Красюков
доцент, кандидат технических наук, тел.: +7-909-157-16-76, Национальный исследовательский университет «МИЭТ»; г. Зеленоград, г. Москва, Россия

Information about authors:

Konstantin Aleksandrovich Gerasimov
Process engineer, «Silicon El» group, Bryansk, Russia.

Oleg Olegovich Dantsev
Head of the development management design center, tel.: +7-4832-41-48-85.

Anton Yurievich Krasyukov
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, tel.:+7-909-157-16-76, National Research University of Electronic Technology «MIET»; Zelenograd, Moscow, Russia.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.01.2022; одобрена после рецензирования 02.02.2022; принята к публикации 04.02.2022.
The article was submitted 21.01.2022; approved after reviewing 02.02.2022; accepted for publication 04.02.2022.
Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет, заместитель главного редактора журнала «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении».
Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in Chief Journal « Automation and modeling in design and management».