

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-329-339>
УДК 621.382.232.087.6:004.925.83(045)



Оригинальная статья

Н. Л. Лагунович

*Филиал «Научно-технический центр “Белмикросистемы” Открытого акционерного общества “ИНТЕГРАЛ” – управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”»,
ул. Корженевского, 12, 220108, Минск, Республика Беларусь*

ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ $p-n^+$ -ПЕРЕХОДА В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ

Аннотация. Выполнено приборно-технологическое моделирование кремниевого $p-n^+$ -перехода как в прямоугольной (декартовой), так и в цилиндрической системах координат. В данной полупроводниковой структуре p -область является базой, а n^+ -область выполняет функцию эмиттера в биполярном транзисторе $n-p-n$ -типа. Структура исследованного перехода получена в соответствии с технологическим процессом его изготовления, разработанным с помощью двухмерного моделирования с применением программы *TSuprem4*, входящей в состав программного комплекса фирмы *Synopsys*. Технологическое моделирование позволило определить конструктивно-технологические параметры исследуемой структуры $p-n^+$ -перехода, что дало возможность провести ее приборное проектирование в цилиндрической и в декартовой системах координат с применением программы *Medici*, которая также входит в состав комплекса программ фирмы *Synopsys*. С помощью *Medici* рассчитаны прямые и обратные ветви вольт-амперной характеристики $p-n^+$ -перехода для случаев моделирования в указанных типах систем координат и, соответственно, определен ряд электрофизических параметров структуры перехода. Путем сравнения данных, полученных методом приборно-технологического моделирования, установлено, что рассматриваемая структура может рассчитываться в обоих типах систем координат с высокой степенью точности, так как разброс конструктивно-технологических параметров, определенных при технологическом моделировании для разных систем координат, составил 2,6–7,4 %, а разброс электрофизических параметров, вычисленных в процессе приборного моделирования, – 0,09–8,64 %. Результаты исследования были применены при проектировании новых изделий электронной техники, в основе которых лежит один и более $p-n$ -переходов, при разработке и оптимизации технологических маршрутов их изготовления.

Ключевые слова: $p-n$ -переход, приборно-технологическое моделирование, система координат, технологический процесс, конструктивно-технологический параметр, электрофизический параметр, вольт-амперная характеристика

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторе: Лагунович Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, ведущий инженер Филиала «Научно-технический центр “Белмикросистемы” Открытого акционерного общества “ИНТЕГРАЛ” – управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”». <https://orcid.org/0009-0007-9370-8006>. E-mail: n_dudarby@tut.by

Для цитирования: Лагунович, Н. Л. Приборно-технологическое моделирование $p-n^+$ -перехода в прямоугольной и цилиндрической системах координат / Н. Л. Лагунович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 329–339. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-329-339>

Поступила в редакцию: 27.02.2024

Доработанный вариант: 26.11.2024

Утверждена к публикации: 16.12.2024

Подписана в печать: 23.12.2024

Original article

Nataliya L. Lagunovich

*Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Openly Joint-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL”
Holding Managing Company, 12, Korzhenevskii Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus*

THE DEVICE-PROCESS SIMULATION OF $p-n^+$ JUNCTION IN RECTANGULAR AND CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEMS

Abstract. The silicon $p-n^+$ junction device-process modeling in both rectangular (Cartesian) and cylindrical coordinate systems was executed. In this semiconductor structure the p -region is the base and the n^+ -region performs the function of an

emitter in an $n-p-n$ -type bipolar transistor. The structure of the $p-n^+$ junction explored in this work was obtained in accordance with the manufacturing process by two-dimensional modeling using the *TSuprem4* program, which is part of the *Synopsys* software package. The process simulation allowed determination of constructive-technological parameters of investigated $p-n^+$ junction structure, which made it possible to carry out its device modeling in cylindrical and Cartesian coordinate systems using the *Medici* program, which is also part of the *Synopsys* software package. Direct and reverse branches of the $p-n^+$ junction current-voltage characteristic were computed for modeling cases in these types of coordinate systems and, accordingly, a number of the junction structure electrophysical parameters were determined as a result of calculations performed by *Medici*. By comparing the data obtained by the method of device-process modeling it was found that the considered structure can be calculated in both types of coordinate systems with a high degree of accuracy, since the dispersion of constructive-technological parameters defined by technological modeling in different coordinate systems was 2.6–7.4 %, and the dispersion of electrophysical parameters calculated by in device simulation was 0.09–8.64 %. The obtained research results were applied in the design of new electronic products based on one or more $p-n$ junctions, in the development and optimization of its making process flows.

Keywords: $p-n$ junction, device-process simulation, coordinate system, technological process, constructive-technological parameter, electrophysical parameter, volt-ampere characteristic

Conflict of interest: the author declare that there is no conflict of interest.

Information about the author: *Nataliya L. Lagunovich* – Cand. Sci. (Engineering), Advanced Engineer at Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Open Join-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company. <https://orcid.org/0009-0007-9370-8006>. E-mail: n_dudarby@tut.by

For citation: Lagunovich N. L. The device-process simulation of $p-n^+$ junction in rectangular and cylindrical coordinate systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 329–339 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-4-329-339>

Received: 27.02.2024

Modified: 26.11.2024

Approved for publication: 16.12.2024

Signed to the press: 23.12.2024

Введение. Моделирование выступает важным этапом в процессе разработки и освоения в серийном производстве новых изделий электронной техники, так как сложность интегральных схем и дискретных приборов постоянно возрастает, а их проектные нормы и размеры – уменьшаются. С помощью моделирования в условиях так называемого «виртуального производства» можно получать конкретные образцы полупроводниковых приборных структур [1, 2] с требуемыми электрофизическими характеристиками и параметрами еще до этапа изготовления их реальных экспериментальных образцов. В настоящее время уже разработаны и широко используются программы и программные комплексы, предназначенные для одно-, двух- и трехмерного приборно-технологического моделирования полупроводниковых структур¹.

Исследуемый в данной статье $p-n$ -переход часто служит основной активной областью диодов, стабилитронов, варикапов [3–8] и иных простейших приборных структур, основанных на данном переходе. Однако, находясь в составе биполярных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов [3, 4, 9], МДП-структур [3, 4] и других более сложных приборов, $p-n$ -переходы выполняют функции уже отдельных их областей. Например, они являются эмиттерными и коллекторными переходами биполярных транзисторов, выполняют функции истоковых и стоковых областей в МДП-структурах и т. д. [9, 10]. $p-n^+$ -Переход является эмиттерным в составе биполярного $n-p-n$ -транзистора [3, 4, 9], где p -область – его база, а n^+ -область выполняет функцию эмиттера, причем степень легирования n^+ -области на два-три порядка превышает уровень легирования p -области прибора, обеспечивая тем самым требуемую величину коэффициента усиления транзистора по току. Пробивное напряжение такой структуры является пробивным напряжением эмиттер-база $n-p-n$ -транзистора – одного из наиболее значимых параметров полупроводникового устройства, что и обусловило актуальность проведенных в работе исследований.

Для получения более полной информации об электрофизических характеристиках и параметрах прибора и изучения их особенностей необходимо выполнить моделирование эмиттерного перехода в двух типах системы координат: прямоугольной (декартовой) и цилиндрической.

¹ Design Vision User Guide / SYNOPSIS. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/17411297/design-vision-user-guide> (date of access: 11.07.2022); Guide to using TCAd with examples (Linux and Unix version) / SILVACO. 2009. URL: <https://silvaco.com/wp-content/uploads/product/pdf/GuideTCAD.pdf> (date of access: 17.03.2022).

Моделирование рассматриваемого $p-n^+$ -перехода в цилиндрической системе координат может оказаться более целесообразным, так как его структура симметрична относительно оси Y , что позволяет использовать только половину конструкции при расчетах, приводя к снижению количества узлов сетки, на которую она разбивается, а следовательно, и к уменьшению затрат машинного времени, необходимого для проектирования. Снижение временных затрат на проектирование является важным критерием, так как часто необходимо провести большое количество численных экспериментов в ограниченные сроки. Кроме того, следует определить, насколько высока точность расчетов, выполненных в различных системах координат и насколько велико отличие результатов, полученных в указанных типах систем координат.

Таким образом, *целью настоящей работы* было выполнение приборно-технологического моделирования $p-n^+$ -перехода кремниевого транзистора в декартовой и цилиндрической системах координат, получение предварительных значений конструктивно-технологических и электрофизических параметров прибора, а также сравнение результатов вычислений, полученных в двух указанных типах систем координат.

Методы моделирования $p-n^+$ -перехода и материалы, используемые при его изготовлении. Применение в рамках настоящего исследования пакета программ фирмы Synopsys (Design Vision User Guide. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/17411297/design-vision-user-guide>) дало возможность осуществить как технологическое, так и приборное моделирование структуры рассматриваемого $p-n^+$ -перехода и получить предварительную оценку его конструктивно-технологических и электрофизических параметров. В процессе технологического моделирования, выполненного с применением программы для двухмерного проектирования *TSuprem4*, область базы p -типа задавалась не операциями ионного легирования и последующего отжига примеси бора, а путем задания соответствующих параметров акцепторной области $p-n^+$ -перехода. В частности, были указаны размеры данной области и концентрация примеси бора в ней. Эта часть структуры перехода считалась равномерно легированной.

Программа для двухмерного моделирования электрических характеристик прибора *Medici* позволила осуществить приборное проектирование $p-n^+$ -перехода как в цилиндрической системе координат, так и в прямоугольной. Изображения исследуемой структуры и ее вольт-амперных характеристик (ВАХ), полученные путем приборно-технологического проектирования в среде программ *TSuprem4* и *Medici*, выводятся на экран с помощью визуализатора результатов моделирования *TaurusVisual*, который также является частью программного комплекса фирмы Synopsys. Кроме перечисленного в состав указанного комплекса входит так называемая «виртуальная фабрика» по производству полупроводниковых структур *WorkBench* (Design Vision User Guide. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/17411297/design-vision-user-guide>), с помощью которой пользователь может подготовить и осуществить численный эксперимент.

Рассматриваемый в данной статье $p-n^+$ -переход – это часть биполярного транзистора, изготавливаемого на основе кремния, который является основным материалом, применяемым на производствах ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». При изготовлении реальных образцов биполярных транзисторов с указанным эмиттерным (или коллекторным в случае $p-n-p$ -транзистора) переходом область p -типа получают путем ионного легирования бором и его последующей высокотемпературной разгонки, а n^+ -область формируют с помощью ионного легирования фосфором и его последующих отжигов при температуре 850 °С.

Результаты технологического моделирования и их обсуждение. Технологический маршрут изготовления биполярного $n-p-n$ -транзистора включает в себя достаточно большое количество операций, а рассматриваемый в рамках данной статьи $p-n^+$ -переход формируется путем ионного легирования фосфором в область базы p -типа. Таким образом, технологический процесс создания перехода состоял из следующих основных операций:

- 1) формирование базы p -типа, имеющей концентрацию примеси бора в ее области $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
- 2) создание n^+ -эмиттера с помощью ионного легирования фосфором дозой $D \approx 4,06 \cdot 10^{15} \text{ ион/см}^2$ с энергией $E = 60 \text{ кэВ}$ в области базы.

После получения непосредственно p - и n^+ -областей перехода их формирование не заканчивается, так как они являются лишь частью приборных структур, имеющих в своей конструкции $p-n^+$ -переход. Поэтому после выполнения указанных выше этапов следуют еще несколько высокотемпературных отжигов, способных оказать существенное влияние на параметры исследуемых областей:

- 1) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин;
- 2) отжиг в среде N_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 60 мин;
- 3) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин;
- 4) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин;
- 5) отжиг в среде O_2 при температуре $850\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин.

Таким образом, в соответствии с вышеописанным технологическим процессом, моделирование которого выполнено в среде *TSuprem4*, была сформирована структура $p-n^+$ -перехода с конкретными конструктивно-технологическими параметрами, после чего осуществлено его приборное моделирование как в прямоугольной (рис. 1), так и в цилиндрической (рис. 2) систе-

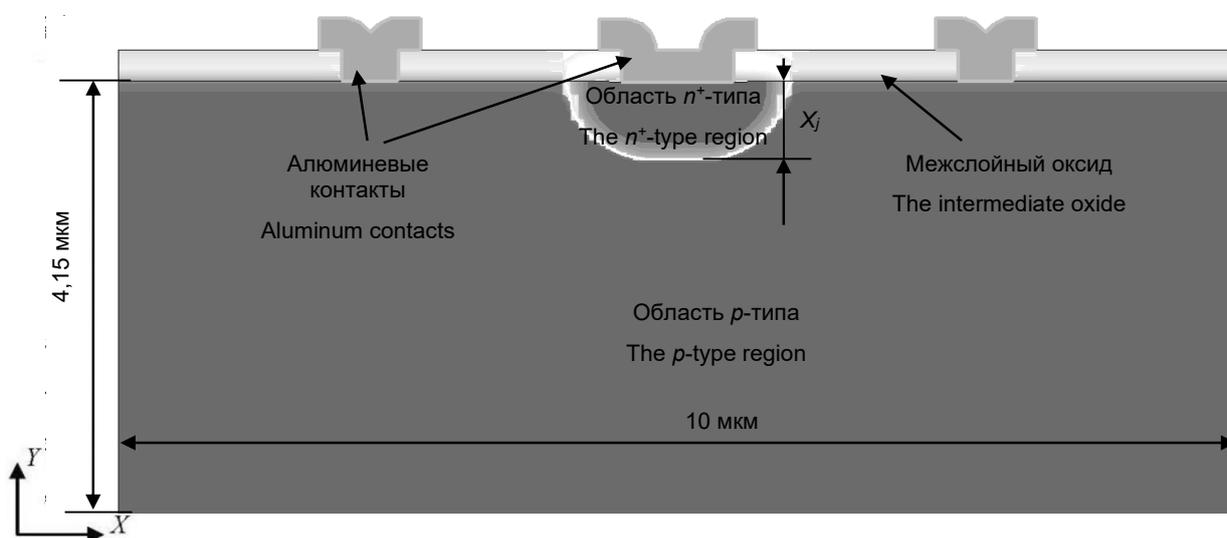


Рис. 1. Полная структура $p-n^+$ -перехода, полученная для приборного моделирования в прямоугольной системе координат

Fig. 1. The complete structure of the $p-n^+$ junction obtained for device modeling in a rectangular coordinate system

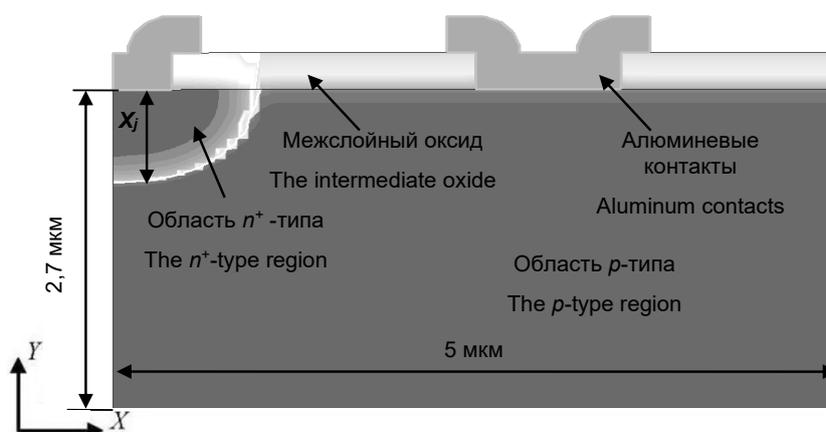


Рис. 2. Половина структуры $p-n^+$ -перехода, полученная для приборного моделирования как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат

Fig. 2. Half of the $p-n^+$ junction structure obtained for device simulation in both rectangular and cylindrical coordinate systems

мах координат. Размеры активных областей структуры, изображенной на рис. 2, равны половине размеров тех же областей структуры, приведенной на рис. 1, и ее приборное моделирование выполнено как в цилиндрической, так и в прямоугольной системах координат.

Особенностью моделирования в цилиндрической системе координат в среде программы *Medici* является то, что расчет ведется для конструкции, получаемой путем вращения структуры, созданной с помощью *TSuprem4*. С целью приведения в соответствие результатов приборного моделирования в указанных типах систем координат (в прямоугольной и цилиндрической), в процессе технологического моделирования координаты областей были заданы таким образом, чтобы получить не полную структуру (см. рис. 1), а ее половину (см. рис. 2). Конструкция, приведенная на рис. 2, была использована в дальнейшем для приборного моделирования в цилиндрической системе координат. Кроме того, было выполнено приборное моделирование полученной половины структуры $p-n^+$ -перехода (см. рис. 2) еще и в прямоугольной системе координат для проведения сравнительного анализа результатов расчетов.

Структуры, изображенные на рис. 1, 2, предназначенные для приборного моделирования как в декартовой (структура на рис. 1), так и в цилиндрической и декартовой (структура на рис. 2) системах координат, имеют одинаковые конструктивно-технологические параметры и размеры в поперечном сечении, но различаются по площади в планарной плоскости $p-n^+$ -перехода. В ходе моделирования был получен ряд значений конструктивно-технологических параметров, порогового и пробивного напряжений рассматриваемого $p-n^+$ -перехода (таблица).

Значения конструктивно-технологических параметров, порогового и пробивного напряжений $p-n^+$ -перехода, полученные в результате моделирования

Values of structural and technological parameters, threshold and breakdown stresses of the $p-n^+$ junction obtained as a result of modeling

Тип структуры, используемой для моделирования	Значения конструктивно-технологических параметров областей			Значения порогового напряжения при токе, протекающем через $p-n^+$ -переход, $U_{пор}$, В	Значения пробивного напряжения при токе, протекающем через $p-n^+$ -переход, $U_{проб}$, В
	Область p -типа	Область n^+ -типа			
	Удельное сопротивление, ρ , Ом·см	Поверхностное сопротивление, R_s , Ом/кв	Глубина $p-n^+$ -перехода, X_j , мкм		
Полная структура в прямоугольной системе координат	0,062	27	0,74	0,88 (при токе $1 \cdot 10^{-4}$ А)	8,73 (при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А)
Половина структуры в прямоугольной системе координат	0,062	25	0,76	0,81 (при токе $1 \cdot 10^{-4}$ А)	8,78 (при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А)
Структура в цилиндрической системе координат	0,062	25	0,76	0,88 (при токе $1 \cdot 10^{-4}$ А)	8,65 (при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А)

Исходя из данных, приведенных в таблице, можно рассчитать разницу в значениях поверхностного сопротивления (R_s) области n^+ -типа, полученных в результате моделирования полной структуры в прямоугольной системе координат, а также в результате моделирования половины структуры в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Такая разница составила $27 \text{ Ом/кв} - 25 \text{ Ом/кв} = 2 \text{ Ом/кв}$ ($\sim 7,4 \%$). Различие в значениях глубины залегания $p-n^+$ -перехода X_j , рассчитанных в результате моделирования полной структуры в декартовой системе координат и при моделировании ее половины в прямоугольной и цилиндрической системах координат, составило $0,76 \text{ мкм} - 0,74 \text{ мкм} = 0,02 \text{ мкм}$ ($\sim 2,6 \%$).

Таковыми небольшими разбросами в полученных результатах можно пренебречь, так как они, вероятней всего, обусловлены различиями в сетке, на которые разбиваются моделируемые структуры в процессе выполнения вычислений, как показано на рис. 3.

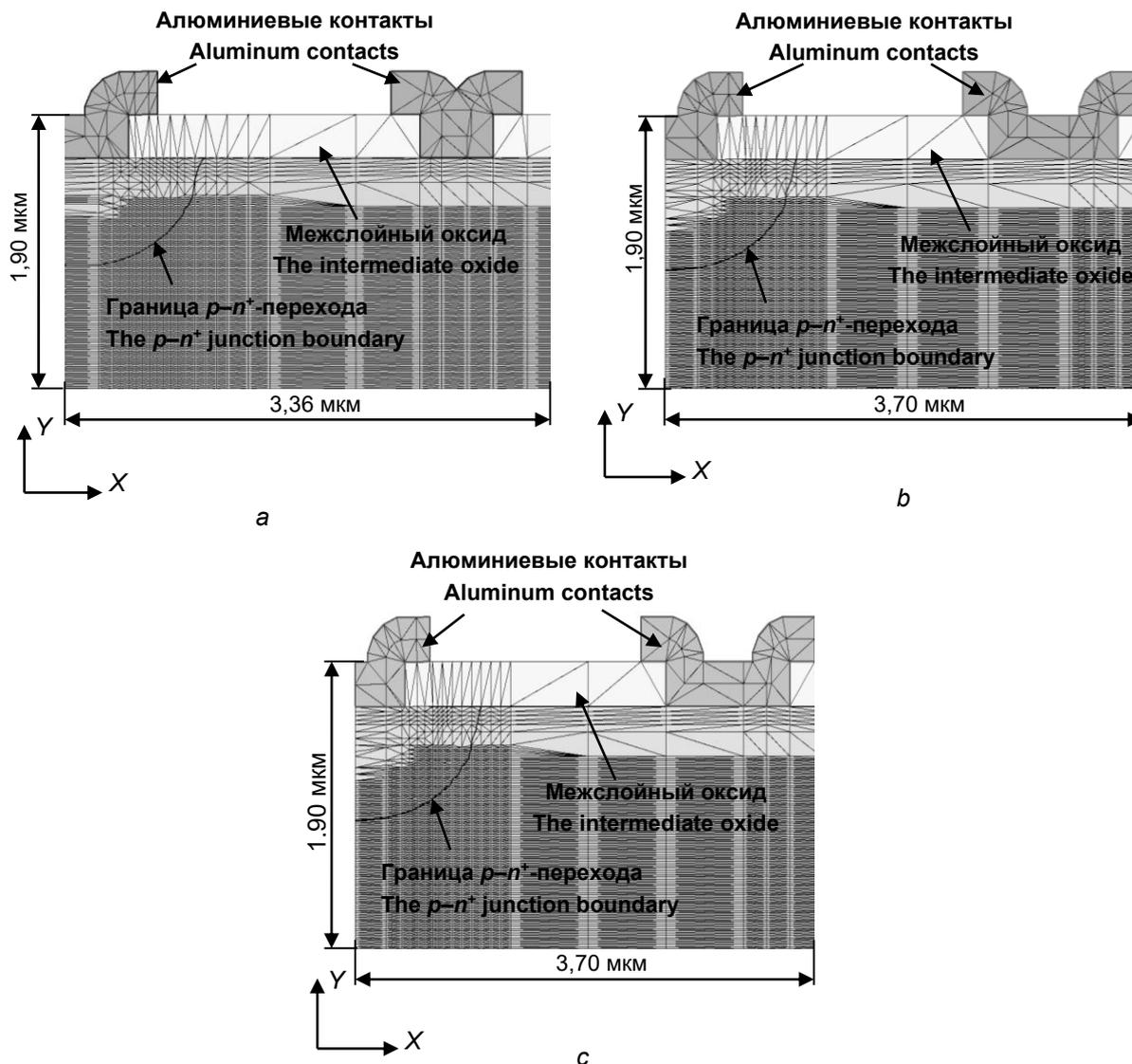


Рис. 3. Фрагмент структуры $p-n^+$ -перехода, показанной на рис. 1, полученной в результате моделирования в прямоугольной системе координат (a); фрагмент структуры $p-n^+$ -перехода, показанной на рис. 2, полученной в результате моделирования в прямоугольной системе координат (b); фрагмент структуры $p-n^+$ -перехода, показанной на рис. 2, полученной в результате моделирования в цилиндрической системе координат (c), с изображением сетки

Fig. 3. The $p-n^+$ junction structure fragment shown in Fig. 1, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (a); the $p-n^+$ junction structure fragment shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (b); the $p-n^+$ junction structure fragment shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a cylindrical coordinate system (c), with a grid image

Установлено, что размер моделируемой части исследованного в рамках данной работы $p-n^+$ -перехода оказывает некоторое влияние на значения его конструктивно-технологических параметров. Определенные в значениях параметров различия, вероятней всего, обусловлены погрешностью расчетов, выполненных в среде программы *TSuprem4*. Данная погрешность, в частности, возникает из-за разницы в значениях шагов сетки, на которые разбивается структура в процессе вычислений конечно-разностным методом [2], что, например, можно увидеть на рис. 3. Так, сетки на рис. 3, b, c (2 рисунка – 2 сетки) визуально почти одинаковы, но заметно отличаются от сетки, представленной (1 рисунок – 1 сетка) на рис. 3, a. Как уже было упомянуто, на параметры сетки могут оказать влияние геометрические размеры структуры, на которые, в свою очередь, влияет тип системы координат, что и обусловило разброс в значениях конструктивно-технологических параметров. Следует также отметить, что использованное в рамках данной

работы программное обеспечение способно самостоятельно задавать параметры ячеек, на которые разбивается структура, с целью повышения точности вычислений и сходимости итерационных процессов.

Обсуждение результатов приборного моделирования. С помощью программы *Medici*, предназначенной для двухмерного моделирования электрических характеристик прибора, было осуществлено приборное проектирование структур, полученных в среде программы *TSuprem4* и приведенных на рис. 1, 2, в прямоугольной системе координат, а также структуры, изображенной на рис. 2, – в цилиндрической системе координат. Итоги приборного моделирования, выводимые на экран с помощью визуализатора результатов моделирования *TaurusVisual*, представлены на рис. 4, 5 и в таблице.

Из рис. 4, где приведены зависимости протекающего через исследуемую структуру тока от прямого напряжения смещения, можно определить пороговые напряжения ($U_{\text{пор}}$) $p-n^+$ -перехода для рассматриваемых случаев моделирования. Значение $U_{\text{пор}}$, определяемого при токе 100 мкА ($1 \cdot 10^{-4} \text{ А}$), структур, показанных на рис. 1, 2, полученное в результате расчетов в декартовой системе координат, составило $0,88 \text{ В}$ (кривые 1, 2 на рис. 4); значение $U_{\text{пор}}$ структуры, представленной на рис. 2, рассчитанное в цилиндрической системе координат, оказалось равным $0,81 \text{ В}$ при том же значении силы тока (100 мкА) (кривая 3 на рис. 4). Значения $U_{\text{пор}}$ $p-n^+$ -перехода как для конструкции, изображенной на рис. 1, так и для структуры, показанной на рис. 2, приведены в предпоследнем столбце таблицы для обоих случаев моделирования в разных типах системы координат. На рис. 3 видно, что с ростом прямого напряжения смещения различия зависимости I от графиков 2 и 3 существенно возрастают, что может быть обусловлено размерами модели-

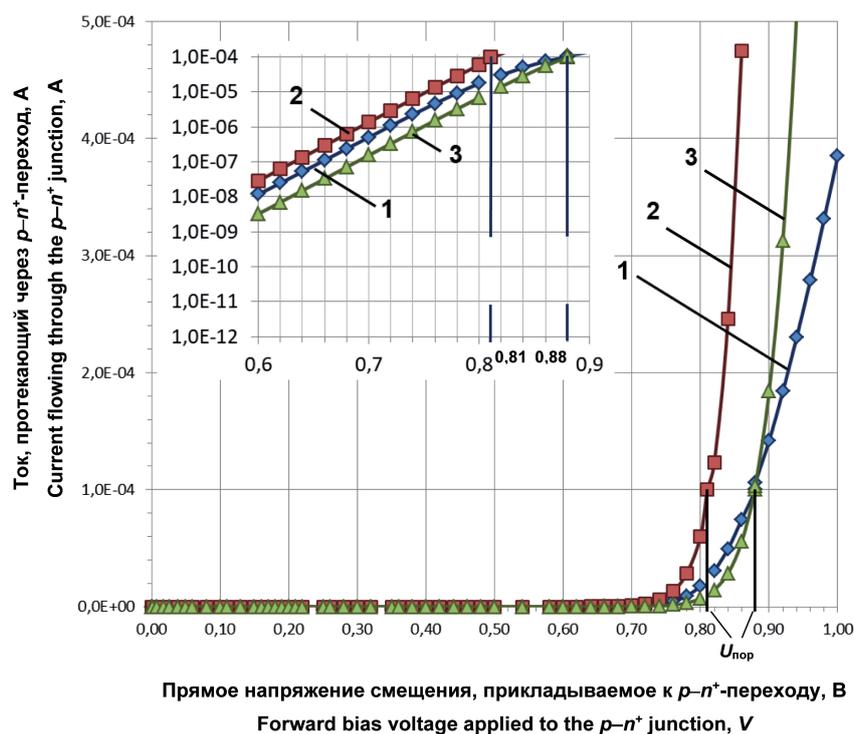


Рис. 4. Прямая ветвь ВАХ $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 1, в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 1); прямая ветвь ВАХ $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 2); прямая ветвь ВАХ $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в цилиндрической системе координат (кривая 3)

Fig. 4. The volt-ampere characteristic direct branch of the design $p-n^+$ junction shown in Fig. 1, obtained as a result of simulation in a rectangular coordinate system (curve 1); the volt-ampere characteristic direct branch of the design $p-n^+$ junction shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (curve 2); the volt-ampere characteristic direct branch of the design $p-n^+$ junction shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a cylindrical coordinate system (curve 3)

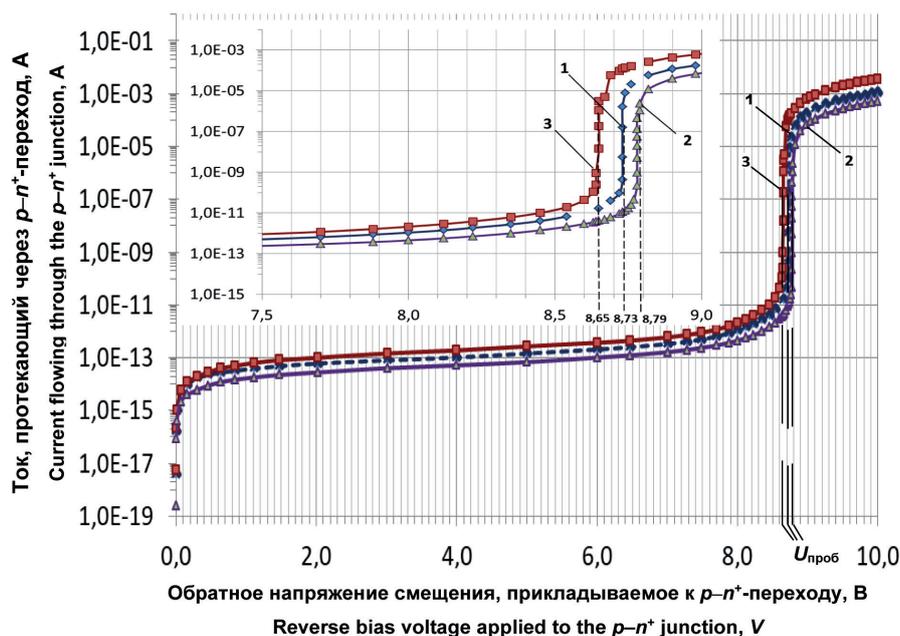


Рис. 5. Пробивная характеристика исследуемого $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 1, полученная в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 1); пробивная характеристика $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в прямоугольной системе координат (кривая 2); пробивная характеристика $p-n^+$ -перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в цилиндрической системе координат (кривая 3)

Fig. 5. The breakdown characteristic of the observable $p-n^+$ junction with structure shown in Fig. 1, obtained as a result of simulation in a rectangular coordinate system (curve 1); the breakdown characteristic of the observable $p-n^+$ junction with structure shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a rectangular coordinate system (curve 2); the breakdown characteristic of the observable $p-n^+$ junction with structure shown in Fig. 2, obtained as a result of modeling in a cylindrical coordinate system (curve 3)

руемых структур и отличиями в значениях шага ячейки, на которые разбиваются исследуемые варианты $p-n^+$ -перехода.

Указанные различия в размерах структур и, соответственно, ячеек, на которые они делятся, привели, вероятней всего, к разным значениям поверхностных R_s и, соответственно, удельного сопротивления (ρ_v) области n^+ -типа, что, в свою очередь, обусловило отличие наклона зависимости I от наклонов кривых 2 и 3 на рис. 4. Большее сопротивление n^+ -области структуры, изображенной на рис. 1, обусловило больший наклон прямой ветви ВАХ (кривая 1 на рис. 4) по отношению к наклонам зависимостей токов, протекающих через $p-n^+$ -переход, от прямого напряжения смещения (кривые 2 и 3 на рис. 4), особенно, при высоких уровнях инжекции. То есть, ток, протекающий через конструкцию, изображенную на рис. 1, растет медленней, чем через структуру, представленную на рис. 2, для случаев моделирования последней в разных типах систем координат. При этом следует отметить, что сопротивление p -области задано изначально одинаковым для обеих конструкций. Наклоны зависимостей 2 и 3 на рис. 4 при высоких уровнях инжекции приблизительно одинаковы, так как удельные сопротивления их n^+ -областей также равны между собой. Однако, как видно из рис. 4, зависимости 2 и 3 отличаются значениями $U_{пор}$, что можно объяснить различиями в погрешности вычислений, осуществленных для структуры, показанной на рис. 2, в разных типах системы координат. Структура, изображенная на рис. 2, в случае ее приборного моделирования в декартовой системе координат имеет площадь в планарной плоскости $5 \text{ мкм} \cdot 1 \text{ мкм} = 5 \text{ мкм}^2$, а случае ее приборного моделирования в цилиндрической системе координат – $\pi \cdot (5 \text{ мкм})^2 \approx 78,5 \text{ мкм}^2$.

В целом полученные величины $U_{пор}$ достаточно близки для рассматриваемых условий расчетов, и их разброс оказался небольшим при заданных значениях тока ($1 \cdot 10^{-4}$ А) через структуру: $0,88 \text{ В} - 0,88 \text{ В} = 0 \text{ В}$ (0 %) и $0,88 \text{ В} - 0,81 \text{ В} = 0,07 \text{ В}$ ($\approx 8,6$ %).

На рис. 5 приведены зависимости тока, протекающего через $p-n^+$ -переход (см. рис. 1, 2) от обратного напряжения смещения, полученные в результате моделирования в прямоугольной и цилиндрической системах координат. Из них можно определить величины пробивного напряжения $p-n^+$ -перехода $U_{\text{проб}}$ при токе, протекающем через переход, равном 1 мкА.

Как видно из рис. 5, пробивное напряжение ($U_{\text{проб}}$) структуры, показанной на рис. 1, после расчетов, выполненных в прямоугольной системе координат, составило 8,73 В (кривая 1) при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А; значение $U_{\text{проб}}$ $p-n^+$ -перехода, изображенного на рис. 2, после моделирования также в прямоугольной системе координат оказалось равным 8,79 В (кривая 2) при токе $1 \cdot 10^{-6}$ А; в результате моделирования в цилиндрической системе координат структуры, приведенной на рис. 2, величина $U_{\text{проб}}$ при токе, равном $1 \cdot 10^{-6}$ А (кривая 3), составило 8,65 В. Значения $U_{\text{проб}}$ исследуемого $p-n^+$ -перехода как для структуры, показанной на рис. 1, так и для структуры, изображенной на рис. 2, приведены в последнем столбце таблицы для обоих случаев моделирования в указанных типах системы координат.

Как видно из таблицы, в случае приборного моделирования полупроводниковых структур с применением программы *Medici* выбор системы координат оказывает влияние на результаты расчетов, причиной чего, вероятней всего, послужили различия в размерах используемой конструкции (см. рис. 1, 2), вызвавшие разницу в параметрах шагов ячеек, на которые структура разбивается. Однако разбросы в значениях пробивных напряжений ($U_{\text{проб}}$), полученные в результате приборного моделирования в разных системах координат (прямоугольной и цилиндрической), незначительны и составляют $8,73 \text{ В} - 8,65 \text{ В} = 0,08 \text{ В}$ ($\sim 0,9 \%$) и $8,79 \text{ В} - 8,65 \text{ В} = 0,14 \text{ В}$ ($\sim 1,6 \%$).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что приборное моделирование, выполняемое с применением программы *Medici*, дает результаты с высокой степенью точности как в случае вычислений в прямоугольной системе координат, так и в случае расчетов в цилиндрической системе, а полученной в процессе моделирования разницей в значениях $U_{\text{пор}}$ и $U_{\text{проб}}$ можно пренебречь.

Заключение. В ходе работ, выполненных в рамках данного исследования, было осуществлено приборно-технологическое моделирование структуры кремниевого $p-n^+$ -перехода, p -область которого является базой, а n^+ -область – эмиттером биполярного $n-p-n$ -транзистора как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат. В результате моделирования, проведенного в соответствии с разработанным в рамках данной работы технологическим маршрутом изготовления, были определены конструктивно-технологические параметры исследуемой структуры, ее пороговые и пробивные напряжения. В процессе сравнительного анализа результатов вычислений установлено, что разброс значений поверхностного сопротивления (R_s) области n^+ -типа для случаев моделирования полной структуры $p-n^+$ -перехода в прямоугольной системе координат и его половины в прямоугольной и цилиндрической системах координат невелик и составляет $\sim 7,4 \%$. Однако различия в значениях R_s , а следовательно, и удельного сопротивления (ρ_v) привели к разнице наклонов прямой ветви ВАХ, полученной в результате моделирования полной структуры в прямоугольной системе координат и в результате расчетов для половины конструкции, выполненных как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат. Полученное различие в значениях глубины залегания (X_j) $p-n^+$ -перехода в случае моделирования полной структуры перехода в прямоугольной системе координат и в случае моделирования его половины в прямоугольной и цилиндрической системах координат составило $\sim 2,6 \%$. Разница в значениях конструктивно-технологических параметров, полученных в результате технологического моделирования, является небольшой, а на величину параметров влияет геометрический размер моделируемой части структуры, на который, в свою очередь, оказывает свое воздействие система координат. Различия в общих размерах моделируемых структур, связанных с особенностями вычислений в двух указанных типах систем координат, повлекли за собой разницу в размерах ячеек, на которые делится исследуемый переход в процессе расчетов.

Сравнение данных, полученных в результате приборного моделирования с применением программы *Medici*, позволило установить, что при расчетах прямой ветви ВАХ разброс значений $U_{\text{пор}}$ для рассмотренных случаев моделирования составил от 0 % до $\sim 8,6 \%$ и может быть вызван

различиями в размерах ячеек сетки, на которые разбивается моделируемая структура. Также было установлено, что при моделировании обратной ветви ВАХ на результаты расчетов свое воздействие оказывает тип системы координат, который определяет размер моделируемой конструкции. При этом полученные в результате вычислений в прямоугольной и цилиндрической системах координат значения $U_{\text{проб}}$ мало отличались друг от друга, а разница их величин для случаев моделирования в двух указанных типах систем координат составила $\sim 0,9\%$ или $\sim 1,6\%$. Погрешность приборов, с помощью которых выполняют измерения характеристик и показателей экспериментальных образцов, составляет $\pm 10\%$, и полученные разбросы в значениях конструктивно-технологических и электрофизических параметров $\sim 0,9\text{--}8,6\%$, обусловленные различиями в размерах ячеек сетки, на которые разбивается моделируемая структура, незначительны и ими можно пренебречь.

Таким образом, выполненное с помощью программы *Medici* приборное моделирование структуры исследуемого кремниевого $p\text{--}n^+$ -перехода позволяет достаточно точно получать значения его пороговых и пробивных напряжений как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат.

Проведенные в рамках данной работы исследования можно использовать при проектировании новых конструкций дискретных приборов и элементов интегральных схем, основанных на $p\text{--}n$ -переходах, а также при разработке и оптимизации технологических маршрутов их изготовления.

Список использованных источников

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / П. Антонетти [и др.]; под общ. ред. П. Антонетти. – М.: Радио и связь, 1988. – 490 с.
2. Абрамов, И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем / И. И. Абрамов. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 152 с.
3. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн.: пер. с англ. / С. Зи. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – Кн. 1. – 456 с.
4. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
5. Дудар, Н. Л. Моделирование электрических характеристик и расчет конструктивных параметров кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 В / Н. Л. Дудар, В. С. Сякерский, Н. Н. Коротко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 3. – С. 10–12.
6. Дудар, Н. Л. Приборно-технологическое моделирование дискретного кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 Вольт / Н. Л. Дудар, В. М. Борздов // Электроника-инфо. – 2011. – № 2. – С. 77–80.
7. Лагунович, Н. Л. Моделирование влияния типа эпитаксиальной пленки на электрические характеристики высоковольтных кремниевых диодов / Н. Л. Лагунович, А. С. Турцевич, В. М. Борздов, // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 2. – С. 98–102.
8. Лагунович, Н. Л. Моделирование высоковольтного кремниевого диода, построение зависимостей его плотности тока от температуры / Н. Л. Лагунович // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем: сб. тр. IX Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 5–8 окт., 2020 г.: в 4 вып. – М., 2020. – Вып. 2. – С. 22–28.
9. Dudar, N. L. The Simulation of PNP-Transistor as an Element of High-Voltage Integrated Circuits by Various Parameters of Epitaxial Film / N. L. Dudar, V. M. Borzdov // 8th Proc. of IEEE East-West Design & Test Symposium, St. Petersburg, Russia, September 17–20, 2010. – P. 262–263.

References

1. Antonetti P., Antoniadis D. A., Dutton R. W., Oldham W. G. (eds.). *Process and Device Simulation for MOS-VLSI Circuits*. Springer, 1983. 636 p. (NATO Science Series E: Applied Science; no. 62).
2. Abramov I. I. *Lectures on Simulation of Integrated Circuits Elements*. Moscow, Izhevsk, NITS “Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika” Publ., 2005, 152 p. (in Russian).
3. Sze S. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., 1981. xiv, 812 p.
4. Muller R. S., Kamins T. I. *Device Electronics for Integrated Circuits*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd., 1986. 524 p.
5. Dudar N. L., Syakerskiy V. S., Korytko N. N. The electric characteristics simulation and structural parameters calculation of Si based stabilatron with stabilizing voltage 6.5 V. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature* [Technology and Construction in Electronic Equipment], 2009, no. 3, pp. 10–12 (in Russian).

6. Dudar N. L., Borzdov V. M., Korytko N. N. The device-technological simulation of the discrete Si based stabilitrion with stabilizing voltage 6.5 V. *Elektronika-info* [Electronics-Info], 2011, no. 2, pp. 77–80 (in Russian).

7. Lagunovich N. L., Turtsevich A. S., Borzdov V. M. Simulation of influence of epitaxial film type on electrical characteristics of high-voltage silicon diodes. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 2, pp. 98–102 (in Russian).

8. Lagunovich N. L. High-voltage silicon diode simulation, the dependences of its current density from temperature construction. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem: sbornik trudov IX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Moskva, 5–8 oktyabrya, 2020 g.* [Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development: Collection of Works of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference, Moscow, October 5–8, 2020]. Moscow, 2020, Iss. 2, pp. 22–28 (in Russian).

9. Dudar N. L., Borzdov V. M. The Simulation of PNP-Transistor as an Element of High-Voltage Integrated Circuits by Various Parameters of Epitaxial Film. *8th Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium*. St. Petersburg, 2010, pp. 262–263.