

# Исследование электрофизических свойств $p-n^+$ -перехода с помощью моделирования в декартовой и цилиндрической системах координат

Н.Л. Лагунович

ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск,  
n\_dudarby@tut.by

**Аннотация** — Основной целью данной работы было выполнение двумерного моделирования перехода  $p-n^+$ -типа в кремнии как в декартовой (прямоугольной), так и в цилиндрической системах координат. Для выполнения приборного моделирования исследованного перехода в указанных системах координат необходимо было предварительно получить структуру перехода, для чего было выполнено его двумерное технологическое моделирование с помощью программы TSuprem4, которая является частью программного комплекса фирмы Synopsys. По результатам технологического моделирования были определены значения конструктивно-технологических параметров исследуемой структуры  $p-n^+$ -перехода. Приборное моделирование как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат было осуществлено с использованием программы для двумерного моделирования электрических характеристик прибора Medici, также являющейся составной частью комплекса фирмы Synopsys. Приборное моделирование позволило оценить значения некоторых электрофизических параметров перехода и построить его пробивные характеристики как для случая моделирования в декартовой, так и для случая моделирования в цилиндрической системах координат. Сравнительный анализ результатов приборно-технологического моделирования показал, что для рассматриваемого  $p-n^+$ -перехода разница в значениях технологических и электрофизических параметров при расчётах в декартовой и цилиндрической системах координат незначительна, составляет от 2.6% до 7.4% для технологического моделирования и 1–1.5% для приборного моделирования, и ей можно пренебречь. Следовательно, рассматриваемую структуру можно моделировать в обеих системах координат с достаточной высокой степенью точности.

**Ключевые слова** —  $p-n$ -переход; моделирование полупроводниковых структур; система координат; технологический процесс; технологический параметр; электрофизический параметр, вольт-амперная характеристика.

## I. ВВЕДЕНИЕ

С повышением степени интеграции изделий в микроэлектронике, с ростом их сложности возрастает потребность в предварительных расчётах их технологических и электрофизических параметров. В настоящее время моделирование полупроводниковых структур [1], [2] занимает важное место при разработке и оптимизации технологии изготовления новых изделий

электронной техники, так как позволяет решить задачу получения конкретных приборов с заданными электрофизическими свойствами и электрическими характеристиками ещё до этапа изготовления их экспериментальных образцов. В результате были разработаны программы для одно-, двух- и трёхмерного моделирования технологических процессов изготовления и вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборных структур [3], [4]. В данной работе речь идёт о моделировании  $p-n$ -перехода [5], [6], который часто выполняет не только функции основной активной области прибора, например, диода, стабилитрона [5]-[10] но и функции одной из частей полупроводниковой структуры, в частности переходов биполярных  $p-p-n$ - и  $p-n-p$ -транзисторов [5], [6], [11], истоковых и стоковых областей в МДП-структурах [5], [6] и т. д. Степень легирования  $n$ - или  $p$ -области определяет электрофизические свойства и характеристики прибора. В данной статье исследуется  $p-n^+$ -переход, в котором  $p$ -область выполняет функцию базы, а  $n^+$ -область – функцию эмиттера в биполярном  $p-p-n$ -транзисторе [5], [6], [11]. Целью данной работы было выполнение моделирования исследуемого  $p-n^+$ -перехода кремниевого транзистора в декартовой и цилиндрической системах координат для получения предварительной оценки конструктивных размеров и электрофизических параметров прибора и сравнения результатов расчётов, полученных в различных системах координат.

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Так как в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» приборы изготавливаются в основном на кремниевых пластинах, в данной работе речь идёт о моделировании  $p-n^+$ -перехода, получаемого в кремнии. Приборно-технологическое моделирование исследуемой структуры осуществлялось с использованием программного комплекса фирмы Synopsys [4] версии V-2003.12-0. Технологическое моделирование выполнено с применением программы для двумерного проектирования TSuprem4, а приборное моделирование как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат было выполнено с использованием программы для двумерного моделирования электрических характеристик прибора Medici. Обе программы входят в состав программного комплекса фирмы

Synopsys, куда также входит визуализатор результатов моделирования TaurusVisual, с помощью которого были получены изображения структуры исследуемого перехода и его электрических характеристик. В состав вышеназванного комплекса входит также программа подготовки эксперимента WorkBench, представляющая собой виртуальную фабрику по производству полупроводниковых схем и приборов [4].

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках настоящей работы структура исследуемого р-n+-перехода была получена путём ионного легирования фосфором в область базы р-типа в процессе формирования биполярного n-p-n-транзистора. Таким образом, маршрут формирования рассматриваемого перехода включает следующие основные этапы с соответствующими основными параметрами:

- 1) создание области базы р-типа с концентрацией бора  $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;
- 2) формирование области эмиттера n<sup>+</sup>-типа путём ионного легирования фосфором дозой  $D \approx 4.06 \cdot 10^{15} \text{ ион/см}^2$  с энергией  $E = 60 \text{ кэВ}$  в область базы.

После выполнения приведенных выше операций в процессе получения готового изделия выполнены несколько высокотемпературных обработок, повлиявших на параметры рассматриваемых областей:

- 1) отжиг при температуре 850 °С в среде O<sub>2</sub> в течение 30 минут;
- 2) отжиг при температуре 850 °С в среде N<sub>2</sub> в течение 60 минут;
- 3) отжиг при температуре 850 °С в среде O<sub>2</sub> в течение 30 минут;
- 4) отжиг при температуре 850 °С в среде O<sub>2</sub> в течение 30 минут;
- 5) отжиг при температуре 850 °С в среде O<sub>2</sub> в течение 30 минут.

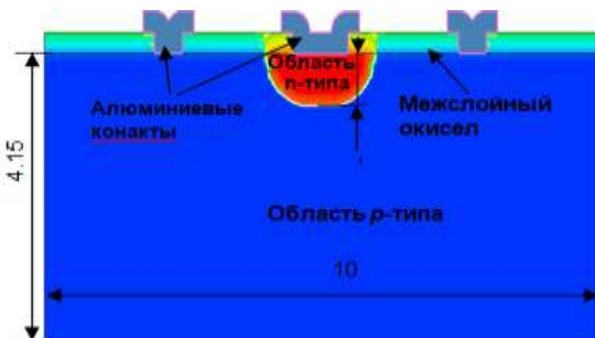


Рис. 1. Полная структура р-n<sup>+</sup>-перехода, полученная для приборного моделирования в декартовой системе координат

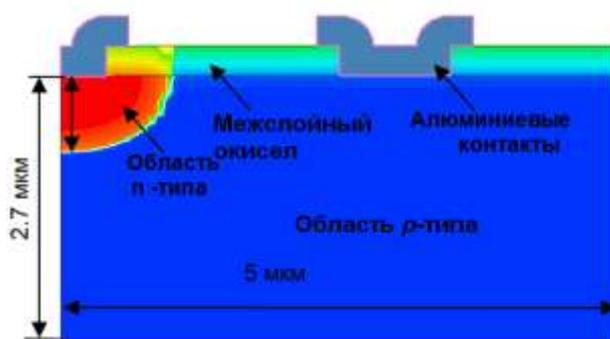


Рис. 2. Половина структуры р-n<sup>+</sup>-перехода, полученная для приборного моделирования как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат

Структура р-n+-перехода для приборного моделирования как в декартовой (см. рис. 1), так и в цилиндрической (см. рис. 2) системах координат была получена по указанному технологическому маршруту с помощью программы для двухмерного технологического моделирования TSuprem4 [4]. Структура, показанная на рис. 2, использовалась для случаев приборного моделирования как в цилиндрической, так и в декартовой системах координат. Размеры её активных областей равны половине размеров тех же областей структуры, приведенной на рис. 1. В случае, когда приборное моделирование выполняется в цилиндрической системе координат, программа ведёт расчёт конструкции, получаемой путём вращения структуры, полученной в результате технологического моделирования.

Следовательно, при технологическом моделировании, позволяющем получить полупроводниковую структуру для приборного моделирования в цилиндрической системе координат, необходимо задавать координаты областей таким образом, чтобы в результате получить не полную структуру (как на рис. 1), а её половину (см. рис. 2). Тогда можно говорить о соответствии результатов моделирования, полученных в вышеуказанных типах системы координат. В данной работе с целью выполнения сравнительного анализа были осуществлены расчёты электрофизических параметров половины исследуемого р-n+-перехода (см. рис. 2) ещё и в прямоугольной системе координат. Все три варианта структуры (полная структура, полученная для моделирования в декартовой системе координат, половины структуры, полученные, как для моделирования в декартовой, так и в цилиндрической системах координат), имея одинаковые размеры в поперечном сечении, показанном на рис. 1 и рис. 2, различаются по площади в планарной плоскости прибора. Это связано с тем, что при моделировании в декартовой системе координат ширина структуры в планарной плоскости по умолчанию составляет 1 мкм, поэтому площадь р-n+-перехода, показанного на рис. 1, составляет 10 мкм<sup>2</sup>, показанного на рис. 2, – 5 мкм<sup>2</sup>. Площадь структуры, изображённой на рис. 2, в случае моделирования в цилиндрической системе координат составит  $\pi(5 \text{ мкм})^2 \approx 78.5 \text{ мкм}^2$ .

Таблица 1

Конструктивно-технологические параметры р-п<sup>+</sup>-перехода, полученные в результате технологического моделирования

	Область р-типа	Область п <sup>+</sup> -типа	
	Удельное сопротивление, $\rho_v$ , Ом·см	Поверхностное сопротивление, $R_s$ , Ом/кв	Глубина р-п <sup>+</sup> -перехода, $X_j$ , мкм
Полная структура в декартовой системе координат	0.062	27	0.74
Половина структуры в декартовой системе координат	0.062	25	0.76
Структура в цилиндрической системе координат	0.062	25	0.76

Конструктивно-технологические параметры исследуемого р-п<sup>+</sup>-перехода, полученные в результате технологического моделирования как для приборного моделирования в прямоугольной системе координат, так и для приборного моделирования в цилиндрической системе координат, представлены в табл. 1. Было установлено, что значение удельного сопротивления области р-типа  $\rho_v$  для всех типов системы координат является одинаковым и составляет 0.062 Ом·см (см. табл. 1), поверхностное сопротивление области п<sup>+</sup>-типа  $R_s$  равно 27 Ом/кв (табл. 1) для случая моделирования полной структуры р-п<sup>+</sup>-перехода в прямоугольной системе координат (см. рис. 1) и 25 Ом/кв (см. табл. 1) для случаев моделирования половины структуры р-п<sup>+</sup>-перехода как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат (см. рис. 2). Глубина залегания р-п-перехода  $X_j$  структуры, изображенной на рис. 1, составила 0.74 мкм а структуры, показанной на рис. 2, как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат равна 0.76 мкм.

Таким образом, как видно из табл. 1, разница в значениях поверхностного сопротивления области п<sup>+</sup>-типа  $R_s$  при моделировании полной структуры в декартовой системе координат, а также при моделировании половины структуры в декартовой системе координат и структуры в цилиндрической системе координат составляет  $27 - 25 = 2$  Ом/кв (~7.4%). Разница в значениях глубины залегания перехода р-п<sup>+</sup>-типа  $X_j$  при моделировании полной структуры в декартовой системе координат, а также при моделировании половины структуры в декартовой системе координат и структуры в цилиндрической системе координат составляет  $0.76 - 0.74 = 0.02$  мкм (~2.6%).

Как следует из вышесказанного, на величины конструктивно-технологических параметров исследуемого р-п<sup>+</sup>-перехода, получаемых в результате технологического моделирования, большее влияние оказывает раз-

мер его моделируемой части, чем система координат, в которой выполняются расчёты. Такую разницу в результатах следует скорее относить к погрешностям моделирования с помощью программы TSuprem4, чем к последствиям выбора системы координат.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИБОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После этапа технологического моделирования, выполненного с помощью программы TSuprem4 [4], был осуществлён этап приборного моделирования структур, показанных на рис. 1 и рис. 2, в декартовой системе координат и структуры, показанной на рис. 2, в цилиндрической системе координат с помощью программы Medici [4]. Результаты приборного моделирования представлены на рис. 3–5 и в табл. 2.

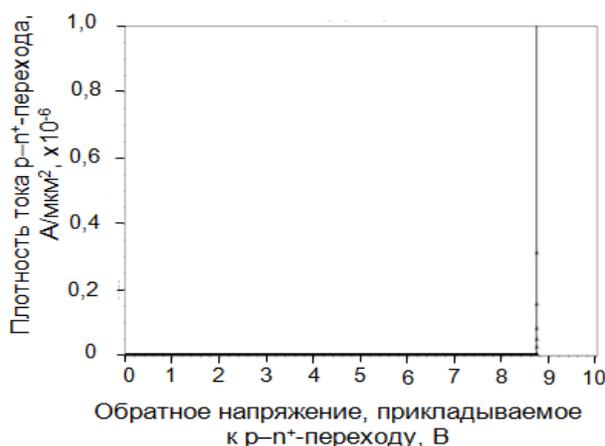


Рис. 3. Пробивная характеристика исследуемого р-п<sup>+</sup>-перехода конструкции, показанной на рис. 1, полученная в результате моделирования в декартовой системе координат

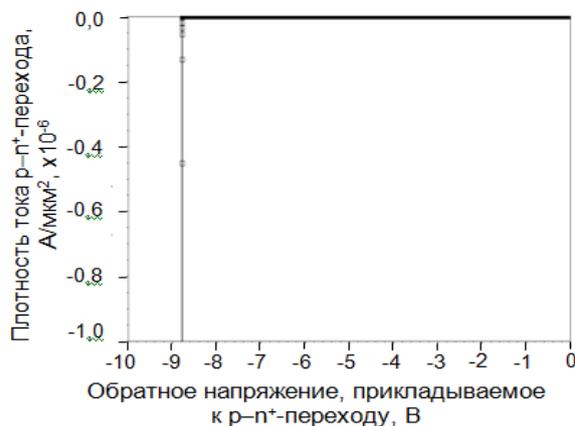
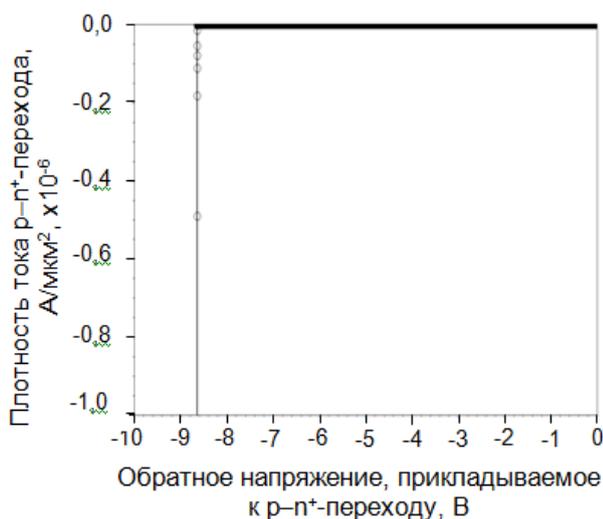


Рис. 4. Пробивная характеристика исследуемого р-п<sup>+</sup>-перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в декартовой системе координат



**Рис. 5.** Пробивная характеристика исследуемого р-п<sup>+</sup>-перехода конструкции, показанной на рис. 2, полученная в результате моделирования в цилиндрической системе координат

Таблица 2

*Расчётные значения пробивного напряжения исследуемого р-п<sup>+</sup>-перехода при токе, протекающем через площадь 1 мкм<sup>2</sup>*

	Значения пробивного напряжения, В
Структура в декартовой системе координат (при токе $1 \cdot 10^{-7}$ А/мкм <sup>2</sup> )	8.74
Половина структуры в декартовой системе координат (при токе $2 \cdot 10^{-7}$ А/мкм <sup>2</sup> )	8.78
Структура в цилиндрической системе координат (при токе $\approx 1.27 \cdot 10^{-8}$ А/мкм <sup>2</sup> )	8.65

Площади структур, показанных на рисунках 1 и 2, в планарной плоскости, для которых моделирование выполнялось как в декартовой, так и цилиндрической системах координат, будут разными. Так как толщина структуры, моделируемой в декартовой системе координат, по умолчанию составляет 1 мкм, то площадь её будет равна произведению толщины (1 мкм) на её размер вдоль оси X. Площадь структуры, моделируемой в цилиндрической системе координат будет равна площади круга с радиусом равным размеру структуры вдоль оси X. С целью приведения в соответствие результатов расчётов, выполненных в разных системах координат и для структур, имеющих различные площади планарной поверхности, брались значения пробивных напряжений исследуемого р-п+-перехода при токах, протекающих через 1 мкм<sup>2</sup> площади таких структур.

Кроме того, следует отметить, что значения тока на пробивной характеристике, изображённой на рис. 3 являются положительными, в отличие от значений

токов на ВАХ, изображённых на рис. 4 и 5, являющихся отрицательными. Такая разница в знаках получаемых токов при аналогичной разнице подаваемых на переход обратных напряжений смещения обусловлена различиями моделируемых структур, изображённых на рис. 1 и 2 (полная структура на рис. 1 и половина структуры на рис. 2). В структуре, изображённой на рис. 1, имеются два контакта к области р-типа, между которыми расположен контакт к области п+-типа, а в структуре, показанной на рис. 2 контакт к области р-типа размещён правее контакта к области п+-типа. Такое расположение контактов к областям обусловило особенности расчётов с применением Medici, где знак подаваемого напряжения смещения определяется последовательностью расположения металлических электродов к областям. Таким образом, для структуры, изображённой на рис. 1, знак подаваемого программой Medici напряжения к областям оказался положительным, соответственно, и ток, протекающий через структуру, имеет положительные значения. Знак напряжения, прикладываемого в программе Medici к областям структуры, показанной на рис. 2, оказался отрицательным, что привело к отрицательным значениям плотности тока через р-п+-переход. В дальнейшем при обсуждении полученных в рамках данной статьи параметров вольт-амперных характеристик р-п+-перехода речь идёт об абсолютных величинах указанных параметров.

На рис. 3 приведена обратная ветвь вольт-амперной характеристики исследуемого р-п+-перехода, а именно, зависимость плотности тока, протекающего через указанный переход, от обратного напряжения смещения, полученная в результате моделирования в прямоугольной системе координат структуры, изображённой на рис. 1. Из зависимости, показанной на рис. 3, можно определить величину пробивного напряжения р-п+-перехода при токе, протекающем через площадь перехода равную 1 мкм<sup>2</sup>. В рассматриваемом случае ток через 1 мкм<sup>2</sup> поверхности составил  $1 \cdot 10^{-7}$  А/мкм<sup>2</sup>, а пробивное напряжение при таком токе равно 8.74 В.

На рис. 4 дана обратная ветвь ВАХ исследуемой структуры, изображённой на рис. 2, полученная также в результате моделирования в прямоугольной системе координат. Из графика пробивной характеристики, изображённой на рис. 4 также можно определить величину пробивного напряжения р-п+-перехода, которая при плотности тока через площадь поверхности перехода 1 мкм<sup>2</sup> составляет  $2 \cdot 10^{-7}$  А/мкм<sup>2</sup>. Величина пробивного напряжения при указанном токе оказалась равной 8.78 В.

Результаты моделирования обратной ветви ВАХ в цилиндрической системе координат структуры, изображённой на рис. 2, показаны на рис. 5, откуда можно определить величину пробивного напряжения исследуемого р-п+-перехода при плотности тока приблизительно равной  $1.27 \cdot 10^{-8}$  А/мкм<sup>2</sup>. Величина пробивного напряжения в данном случае составила 8.65 В.

Значения пробивного напряжения структур, изображённых на рис. 1 и рис. 2, полученные с помощью

приборного моделирования в программе Medici, для удобства сравнения были сведены в табл. 2. В табл. 2 даны значения пробивного напряжения исследованного р–n+-перехода как для случая моделирования структуры, изображённой на рис. 1, и её половины, показанной на рис. 2, в декартовой системе координат, так и для случая моделирования структуры, показанной на рис. 2, в цилиндрической системе координат.

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что при приборном моделировании с использованием программы Medici большее значение имеет тип системы координат, чем размер моделируемой структуры. Как видно из табл. 2, значения пробивных напряжений при расчётах в декартовой и цилиндрической системах координат почти одинаковы. Разница в значениях пробивного напряжения при моделировании в декартовой и цилиндрической системах координат составляет  $8.74-8.65 = 0.09$  В (~1 %) или  $8.78-8.65 = 0.13$  В (~1.5 %). Полученной разницей в вычислениях можно пренебречь и сделать вывод о том, что приборное моделирование, выполняемое с помощью программы Medici, обладает достаточно высокой степенью точности как для случая расчётов в прямоугольной, так и для случая вычислений в цилиндрической системах координат.

#### В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение приборно-технологического моделирования структуры р–n+-перехода, осуществляющего функции перехода база-эмиттер в биполярном n–p–n-транзисторе, в декартовой и цилиндрической системах координат позволило оценить конструктивно-технологические параметры данного перехода и определить его пробивные напряжения. Сравнительный анализ данных моделирования показал, что разница в значениях поверхностного сопротивления области n+-типа  $R_s$  при моделировании полной структуры в декартовой системе координат, а также при моделировании половины структуры как в декартовой системе координат, так и в цилиндрической системе координат составляет ~7.4%. Разница в значениях глубины залегания перехода р–n+-типа  $X_j$  при моделировании полной структуры в декартовой системе координат, а также при моделировании половины структуры в декартовой системе координат и в цилиндрической системе координат составляет ~2.6%. То есть, на величины конструктивно-технологических параметров исследуемого р–n+-перехода, получаемых в результате технологического моделирования, большее влияние оказывает размер его моделируемой части, чем система координат, в которой выполняются расчёты.

Сравнительный анализ результатов приборного моделирования показал, при таком моделировании с

использованием программы Medici большее значение имеет тип системы координат, чем размер моделируемой структуры. Значения пробивных напряжений при расчётах в декартовой и цилиндрической системах координат оказались почти одинаковыми. Разница в них при моделировании в декартовой и цилиндрической системах координат составляет ~1% или ~1.5%. Такой разницей в вычислениях можно пренебречь и сделать вывод о том, что приборное моделирование исследованной структуры р–n+-перехода с помощью программы Medici как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат, позволяет получать значения пробивных напряжений перехода с достаточно высокой степенью точности.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Антонетти П., Антониадис Д., Даттон Р., Оулдхем У. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов. М.: Радио и связь, 1988. 496 с.
- [2] Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 152 с.
- [3] URL: <http://www.silvaco.com> (дата обращения: 17.03.2021)
- [4] URL: <http://www.synopsys.com> (дата обращения: 11.03.2021)
- [5] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1. М.: Мир, 1984. 455 с.
- [6] Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.
- [7] Дудар Н.Л., Сякерский В.С., Корытко Н.Н. Моделирование электрических характеристик и расчёт конструктивных параметров кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 В // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2009. №3. С. 10–12.
- [8] Дудар Н.Л., Борздов В.М. Приборно-технологическое моделирование дискретного кремниевого стабилитрона с напряжением стабилизации 6,5 Вольт // Электроника-инфо. 2011. №2. С. 77–80.
- [9] Лагунович Н.Л., Турцевич А.С., Борздов В.М. Моделирование влияния типа эпитаксиальной плёнки на электрические характеристики высоковольтных кремниевых диодов // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2015. № 2. С. 98–102.
- [10] Лагунович Н.Л. Моделирование высоковольтного кремниевого диода, построение зависимостей его плотности тока от температуры // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. Вып. 2. С. 22-28. doi:10.31114/2078-7707-2020-2-22-28
- [11] 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 // 8<sup>th</sup> Proceedings of EEE East-West Design & Test Symposium, St. Petersburg, Russia, September 17–20. 2010. P. 262–263.

# The Research of P–N<sup>+</sup>-Junction Electrophysical Behavior with Help of Simulation in Rectangular and Cylindrical Coordinate Systems

N.L. Lagunovich

Open Joint-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk,  
n\_dudarby@tut.by

**Abstract** — The aim of this work was execution of silicon p–n<sup>+</sup>-type junction two-dimensional simulation in both Cartesian (rectangular) and cylindrical coordinate systems. To perform device modeling of the examined junction in both rectangular and cylindrical coordinate systems it was necessary to obtain junction structure previously, its two-dimensional technological simulation was performed for that with the help of TSuprem4 program which is the part of Synopsys company software package. The constructive-process variables values of observable p–n<sup>+</sup>-junction structure were defined as consequence of technological modeling. The device simulation was performed in both Cartesian and cylindrical coordinate systems with using Medici program for two-dimensional simulation of device electric characteristics. Medici is the component of Synopsys company software package also. The device modeling has permitted to evaluate some electrophysical parameters of p–n<sup>+</sup>-junction and to plot its breakdown electric characteristics for modeling cases in both rectangular and cylindrical coordinate systems. The comparative analysis of simulation results showed that for the considered p–n<sup>+</sup>-junction the difference in the values of technological and electrophysical parameters for calculating in Cartesian and cylindrical coordinate systems is insignificant. Particularly it is from 2.6% to 7.4% for process simulation. Breakdown voltage values were 8.74 V and 8.78 V after device modeling in Cartesian coordinate system and it was 8.65 V after simulation in cylindrical one. Thereby difference between breakdown voltage values obtained as a result of calculations in rectangular coordinate system and cylindrical one was 1–1.5 %, and it can be ignored. Therefore, the structure under consideration can be modeled in both coordinate systems with sufficiently fine precision.

**Keywords** — p–n-junction, semiconductor structures simulation, coordinate system, technological process, process parameter, electrophysical parameter, volt-ampere characteristic.

## REFERENCES

- [1] Antognetti P., Antoniadis D., Dutton, R., Oldham W. Process and Device Simulation for MOS-VLSI Circuits, Urbino: NATO ASI Series, 1983. 636 p. (Russ. ed.: Suris R.A. MOP-SBIS. Modelirovanie elementov i tehnologicheskikh protsessov. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1988. 496 p.) (in Russian).
- [2] Abramov I.I. Lektsii po Modelirovaniyu Elementov Integralnyh Shem - Lectures on Simulation of Integrated Circuits Elements, Moscow-Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika» Publ., 2005. 152 p. (In Russian).
- [3] URL: <http://www.silvaco.com> (access date: 17.03.2021)
- [4] URL: <http://www.synopsys.com> (access date: 11.03.2021)
- [5] Sze S. Physics of Semiconductor Devices. Prat 1., New York: John Wiley & Sons, 2nd edition, 1981. 873 p. (Russ. ed.: Suris R.A. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Ch. 1., Moscow: Mir Publ., 1984. 455 p.) (in Russian).
- [6] Muller R., Kamins Th. Device electronics for integrated circuits, New York: John Wiley & Sons, 1986. 554 p. (Russ. ed.: Mazel E.Z., Hodosh L.S. Elementy integralnyh shem, Moscow, Mir Publ., 1989. 630 p.) (in Russian).
- [7] Dudar N.L., Syakerskiy V.S., Korytko N.N. Modelirovanie elektricheskikh harakteristik i raschyot konstruktivnykh parametrov kremnievogo stabilitrona s napryazheniem stabilizatsii 6,5 V (The electric characteristics simulation and structural parameters calculation of Si based stabilitron with stabilizing voltage 6.5 V) // Tehnologiya i konstruirovaniye v velektronnoy apparature, 2009. № 3. S. 10–12 (in Russian).
- [8] Dudar N.L., Borzdov V.M. Priborno-tehnologicheskoe modelirovanie diskretnogo kremnievogo stabilitrona s napryazheniem stabilizatsii 6.5 Volt (Device-process simulation of discrete silicon stabilitron with the stabilizing voltage of 6.5 V) // Elektronika-info, 2011. № 2. S. 77–80 (in Russian).
- [9] Lagunovich N.L., Turtsevich A.S., Borzdov V.M. Modelirovanie vliyaniya tipa epitaksialnoi plyonki na elektricheskije harakteristiki vysokovoltnyh kremnievyh diodov (The simulation of type epitaxial film influence on electrical characteristics of high-voltage silicon diodes) // Vestsi Nats. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz-tehn. navuk, 2015. № 2. S. 98–102 (in Russian).
- [10] Lagunovich N.L. High-Voltage Silicon Diode Simulation, the Dependences of Its Current Density from Temperature Construction // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development. 2020. Issue 2. P. 22–28. doi:10.31114/2078-7707-2020-2-22-28
- [11] 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 // 8<sup>th</sup> Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium, St. Petersburg, Russia, September 17–20, 2010. P. 262–263.