

Моделирование высоковольтного кремниевого диода, построение зависимостей его плотности тока от температуры

Н.Л. Лагунович

ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», г. Минск,
n_dudarby@tut.by

Аннотация — Целью данной работы были разработка технологического маршрута изготовления и одномерной модели высоковольтного кремниевого диода с пробивным напряжением в диапазоне от 120 В до 150 В. Выполнены технологического моделирование прибора с помощью программы TSuprem4 программного комплекса фирмы Synopsys и его приборное моделирование с помощью разработанной автором программы MOD-1D. Построена зависимость плотности тока диода от прямого напряжения смещения, прикладываемого к структуре исследуемого прибора. С помощью MOD-1D рассчитаны и построены температурные зависимости плотности тока диода для различных уровней инжекции в диапазоне температур от 0 °С до 165 °С. Установлено, что с повышением температуры р-п-перехода при низких уровнях инжекции наблюдается более заметный рост плотности тока исследуемого прибора, чем при высоких уровнях инжекции. Таким образом, при малых напряжениях смещения, прикладываемых к р-п-переходу диода, он более чувствителен к перепаду температур, чем в случае более высоких прямых напряжений, прикладываемых к его структуре. По разработанному автором технологическому маршруту были изготовлены экспериментальные образцы исследуемого прибора типа 2Д695 в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Ключевые слова — диод, прямое падение напряжения, технологическое моделирование, приборное моделирование, вольт-амперная характеристика, температурная зависимость, уровень инжекции.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время моделирование полупроводниковых структур 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 [1, 2]. В настоящее время различные типы диодов [3, 4] находят широкое применение, как в качестве дискретных приборов, так и в составе интегральных микросхем различного назначения. При работе высоковольтных полупроводниковых приборов [5], каковым является исследуемый в данной работе диод, может выделяться большое количество энергии, вызывающей разогрев его структуры, поэтому часто

возникает задача определить, как изменятся вольт-амперные характеристики прибора с ростом температуры его активных областей. Кроме того, температура окружающей среды, при которой работает прибор, также может оказывать своё влияние на его электрические характеристики. Целью данной работы было разработать технологический маршрут изготовления и эффективную (с точки зрения затрат машинного времени) одномерную модель кремниевого высоковольтного диода с пробивными напряжениями в диапазоне от 120 В до 150 В и выполнить его технологическое и приборное моделирование. Технологическое моделирование осуществлялось с применением программы для двухмерного проектирования TSuprem4 фирмы Synopsys [6, 7], а приборное моделирование было выполнено в интервале температур от 0 °С до 165 °С с применением разработанных автором модели прибора и программы для одномерного приборного моделирования MOD-1D [8].

В частности, можно отметить, что температурные зависимости токов, протекающих через р-п-переход, и падений напряжения на нём часто используют в качестве основных эффектов при изготовлении полупроводниковых датчиков температуры.

II. СТРУКТУРА ДИОДА

В настоящей работе перед выполнением приборного моделирования исследуемого диода с пробивными напряжениями от 120 до 150 В, было осуществлено его технологическое моделирование с помощью программы для двухмерного моделирования TSuprem4 программного комплекса фирмы Synopsys [6, 7]. Рассматриваемый в данной работе прибор изготавливался в эпитаксиальной плёнке типа 17.0КЭФ2.0 (кремний, легированный фосфором, электронного типа проводимости толщиной $d=17.0$ мкм с удельным электрическим сопротивлением $\rho_v = 2.0$ Ом·см), которая наращивалась на подложке типа 100КЭС0.01-(111) (кремниевая пластина диаметром 100 мм, легированная сурьмой, электронного типа проводимости с удельным электрическим сопротивлением $\rho_v = 0.01$ Ом·см, с кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$). Площадь активной области диода составляла 150 мкм², однако, для ускорения процедуры расчетов было выполнено моделирование структуры с меньшей площадью (4 мкм × 1 мкм = 4 мкм²). Структура, полученная в результате двухмерного моделирования, приведена на рис. 1. На рис. 2

представлены распределения концентраций легирующих примесей вдоль направления сечения А, показанного рис. 1.

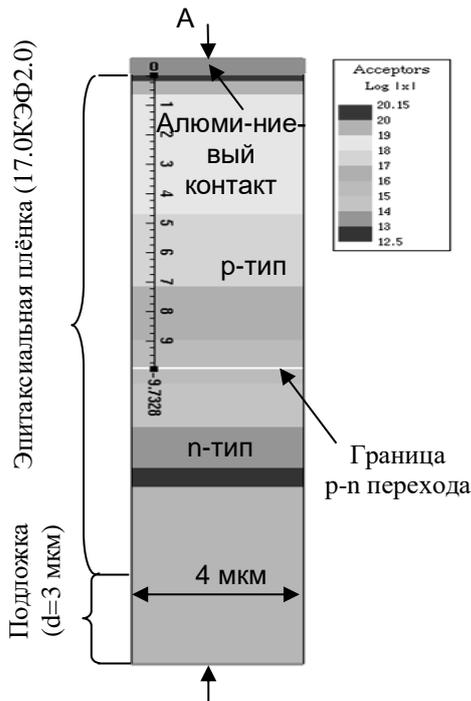


Рис. 1. Часть диодной структуры, изготовленной в эпитаксиальной плёнке типа 17.0КЭФ2.0

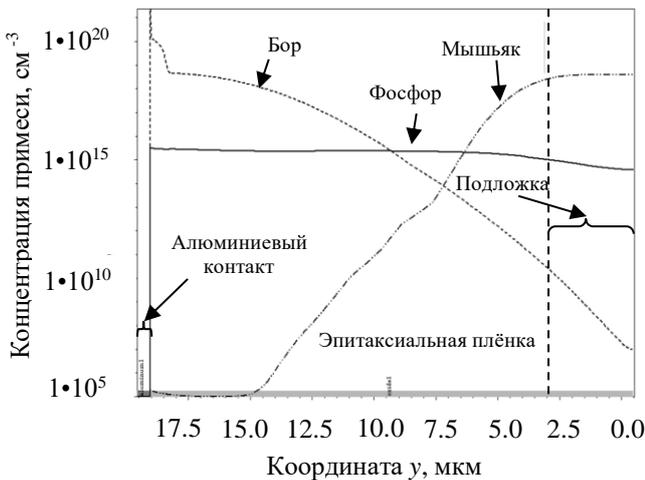


Рис. 2. Распределения концентраций легирующих примесей по глубине диодной структуры, изображённой на рис. 1, в направлении сечения А

III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИОДА

Одна из задач, решаемых в данной работе, – определение параметров технологического процесса изготовления высоковольтных кремниевых диодов типа 2Д695 с пробивным напряжением в диапазоне от 120 В до 150 В. Технологический маршрут изготовления рассматриваемого прибора включал в себя следующие операции:

- выбор в качестве подложки пластины типа 100КЭС0.01-(111) (кремниевая пластина диаметром 100 мм, легированная сурьмой, электронного типа проводимости с удельным электрическим сопротивлением $\rho_v = 0.01$ Ом·см, с кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$);
- формирование эпитаксиальной пленки типа 17.0КЭФ2.0;
- выращивание термического окисла толщиной 700 нм при 1100°C в течение 68 мин.;
- формирование в окисле толщиной 700 нм «окна» диаметром 180 мкм методом химического травления;
- формирование окисла толщиной 150 нм в области вытравленного «окна»;
- ионное легирование бором (дозой $D = 1.56 \cdot 10^{15}$ ион/см² с энергией $E = 60$ кэВ);
- разгонка бора при 1200°C в течение 60 мин.;
- формирование окисла толщиной 600 нм;
- формирование в окисле толщиной 600 нм «окна» диаметром 150 мкм методом химического травления;
- отжиг при 850°C в течение 30 мин. в среде O₂;
- ионное легирование (подлегирование) бором (дозой $D = 1.875 \cdot 10^{15}$ ион/см² с энергией $E = 30$ кэВ) с целью формирования омического контакта к области р-типа;
- утонение пластины до 180 мкм;
- напыление металла для формирования контактов к областям р-типа.

Моделирование технологического маршрута исследуемого диода проводилось с помощью программы для двухмерного технологического моделирования TSUPREM4. На рис. 1 показана полученная в результате моделирования структура высоковольтного диода, изготовленная по приведенному выше технологическому процессу.

Расчетные значения параметров конструкции диодной структуры приведены в табл. 1. Глубина залегания р–п-перехода X_j структуры, изображенной на рис. 1 составила 9.76 мкм; поверхностное сопротивление ее области р-типа R_s равно 42.7 Ом/кв, толщина осажденного окисла D_{ост} = 419.0 нм. В табл. 1 в строке «Типовое значение» приводятся значения соответствующих параметров типичные для эпитаксиальной пленки 25.0КЭФ6.0, полученные экспериментально в результате измерений. Типовые значения определены при проведении следующих измерений: толщины остаточного окисла D_{ост} после выполнения операций окисления, присутствующих в маршруте изготовления диода; поверхностного сопротивления R_s после выполнения операций ионного легирования примеси в эпитаксиальную пленку типа 25.0КЭФ6.0 (кремний, легированный фосфором, электронного типа проводимости толщиной d = 25.0 мкм с удельным электрическим сопротивлением $\rho_v = 6.0$ Ом·см) и ее последующей разгонки; глубины залегания р–п-перехода X_j в указанной эпитаксиальной пленке. Типовые значения являются результатом усреднения величин, полученных после многократно

выполненных измерений (не менее 25). Расчетные значения $D_{ост}$, R_s и X_j , определенные после моделирования технологического процесса изготовления исследуемого высоковольтного диода, получаемого в эпитаксиальной плёнке типа 17.0КЭФ2.0, сравнивались с их типовыми значениями.

Таблица 1

Расчётные значения толщины остаточного окисла $D_{ост}$, поверхностного сопротивления R_s , глубины залегания p-n-перехода X_j после разгонки области p-типа диода

	Толщина остаточного окисла, $D_{ост}$, нм	Поверхностное сопротивление, R_s , Ом/кв	Глубина залегания p-n-перехода, X_j , мкм
Типовое значение ¹⁾	450	40	9.5
Расчётное значение	419	42.7	9.76

¹⁾ Значение, полученное на экспериментальных образцах

Как видно из табл. 1, разница между экспериментальными и расчетными данными составляет не более $\pm 10\%$, что говорит о хорошем согласовании результатов моделирования с данными измерений и о корректности выбранного технологического маршрута изготовления.

IV. МОДЕЛЬ ДИОДА

С целью получения электрофизических параметров и зависимостей после технологического моделирования, как правило, выполняют приборное моделирование. При выполнении приборного моделирования рассматриваемой диодной структуры с помощью разработанной автором программы MOD-1D [8] (программа внедрена и зарегистрирована 21.03.2014 г. под № 125 в Филиале НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ») была использована модель, основу которой составила фундаментальная система уравнений полупроводника (ФСУ) в диффузионно-дрейфовом приближении и в предположении справедливости статистики Больцмана. Алгоритм решения ФСУ составляет основу блока, предназначенного для приборного моделирования полупроводниковых структур, в составе программы MOD-1D.

В состав ФСУ в диффузионно-дрейфовом приближении входят:

уравнение Пуассона

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon \epsilon_0} (p - n + N_d - N_a), \quad (1)$$

где ϕ – электростатический потенциал;

x – значение координаты вдоль направления X;

p , n – концентрации электронов и дырок, соответственно;

q – заряд электрона;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

N_d – концентрация доноров;

N_a – концентрация акцепторов;

и уравнения непрерывности для электронов и дырок

$$\frac{\partial J_n}{\partial x} - q(R - G) - q \frac{\partial n}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial J_p}{\partial x} + q(R - G) + q \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где J_n и J_p – электронная и дырочная составляющие тока;

t – время;

R и G – скорости рекомбинации и генерации носителей заряда, соответственно.

J_n и J_p в выражениях (2) и (3) задавались с учётом диффузионной и дрейфовой составляющих следующими выражениями

$$J_n = qn\mu_n E + q\phi_T \mu_n \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (4)$$

$$J_p = qp\mu_p E - q\phi_T \mu_p \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

где μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок;

E – напряжённость электрического поля;

$\phi_T = k_B T/q$ – температурный потенциал; k_B – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура кристалла.

Предполагалось, что механизм рекомбинации как в объеме, так и на поверхности полупроводника описывается уравнением Шокли-Рида-Холла. Тогда с учётом выражения, описывающего Оже-рекомбинацию, суммарную скорость рекомбинации R можно записать в виде:

$$R = (pn - n_i) \cdot \left(\frac{1}{\tau_n (p + n_i) + \tau_p (n + p_i)} + c_n \cdot n - c_p \cdot p \right), \quad (6)$$

где n_i – собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике;

τ_n , τ_p – времена жизни электронов и дырок, соответственно;

c_n и c_p – коэффициенты Оже-рекомбинации.

Модели подвижностей носителей заряда μ_n и μ_p , взятые в форме зависимостей от распределения легирующей примеси и напряжённости электрического поля, имели в численной модели исследуемого диода следующий вид [9]

$$\mu_n = 65 + \frac{1265}{1 + \exp\left(0.72 \cdot \ln \frac{N_{x1}}{8.5 \cdot 10^{16}}\right) \cdot \sqrt{1 + \left|\frac{E_{\text{внутр}}}{8000}\right|^2}}, \quad (7)$$

$$\mu_p = 47.7 + \frac{447}{1 + \exp\left(0.76 \cdot \ln \frac{N_{x1}}{6.3 \cdot 10^{16}}\right) \cdot \sqrt{1 + \left|\frac{E_{\text{внутр}}}{1.95 \cdot 10^4}\right|^2}}, \quad (8)$$

где N_{x1} – распределение концентрации легирующей примеси, имеющее экспоненциальный характер и описываемое выражением (9);

$E_{\text{внутр}}$ – напряжённость внутреннего электрического поля в полупроводниковой структуре, обусловленная градиентом концентраций легирующих примесей.

В формулах (7) и (8) размерность подвижностей μ_n и μ_p равна $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а параметров N_{x1} и $E_{\text{внутр}}$ – $1/\text{см}^3$ и $\text{В}/\text{см}$, соответственно.

Результирующее распределение концентрации примеси в структуре в зависимости от координаты x в аналитической форме имело вид [9]

$$N_{x1} = N_a(x) - N_d(x) = c_a \exp\left[-(x/L_0)^2\right] - c_d, \quad (9)$$

где $N_a(x)$, $N_d(x)$ – распределение концентраций акцепторов и доноров, соответственно;

c_a – максимальное значение концентрации акцепторов;

c_d – значение концентрации доноров;

L_0 – параметр, задаваемый условием $N(x_{p-n}) = 0$, где x_{p-n} – глубина залегания p-n-перехода.

Решение системы уравнений (1)-(5) осуществлялось методом Гуммеля [10]. Система уравнений (1)-(5) может быть решена только численным методом. На каждой итерации численной реализации метода Гуммеля выражения (1)-(5) в дискретной форме решались методом Гаусса [9, 11]. Алгоритмы реализации указанных способов решения ФСУ совместно с приведенными выше выражениями, описывающими процессы рекомбинации в полупроводниковой структуре (6) и модели подвижности для электронов (7) и дырок (8), заложены в основе разработанной автором программы MOD-1D [8].

V. ОБСУЖДЕНИЕ УСЛОВИЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИБОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как было сказано выше, технологическое моделирование исследуемого в данной работе диода, было выполнено с применением программы TSuprem4, с помощью которой была получена его структура и распределения примесей по её глубине, приведенные на рис. 1, 2.

В процессе моделирования рассматривалась структура, в составе которой учитывалась полная толщина эпитаксиальной плёнки, выращенной на подложке

толщиной 3 мкм (вместо подложки толщиной 180 мкм, получаемой после утонения пластины). Такое ограничение обусловлено максимально допустимым в программе для технологического моделирования TSuprem4 количеством узлов сетки (40000), на которые разбивается моделируемая структура, и количеством времени расчёта. Вклад сопротивления подложки толщиной 180 мкм с $\rho_v = 0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ в общее сопротивление структуры, состоящей из области p-типа, эпитаксиального слоя и подложки, составляет 1 Ом. Прямое падение напряжения на таком сопротивлении при токе 100 мА составляет 0.1 В.

Полученные в результате расчётов значения прямого падения напряжения на диоде определялись при токе $2.264 \times 10^{-5} \text{ А}$, поскольку моделировалась структура площадью $4 \text{ мкм} \times 1 \text{ мкм} = 4 \text{ мкм}^2$. Радиус активной области p-n-перехода диода как прибора равен 75 мкм, тогда общая площадь активной структуры $\pi \cdot (75)^2 \approx 17671.5 \text{ (мкм}^2)$. Ток $2.264 \times 10^{-5} \text{ А}$ через прибор площадью 4 мкм^2 соответствует току 100 мА через прибор площадью 17671.5 мкм^2 . При обратном смещении p-n-перехода диода ток $2.264 \times 10^{-9} \text{ А}$ через прибор площадью 4 мкм^2 соответствует току 10 мкА через прибор площадью 17671.5 мкм^2 .

Полученные в результате расчётов значения параметров структуры и электрических характеристик и параметров диода хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В процессе приборного моделирования диода, осуществившегося с помощью MOD-1D, начальное распределение потенциала определялось, исходя из допущений квазинейтральности и термодинамического равновесия [12]. Расчёт проводился для различных уровней инжекции. Полная глубина моделируемой структуры была определена из рис. 1 и составила 19.6 мкм, а глубина залегания p-n-перехода 9.76 мкм; величина c_a составила $6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а $c_d = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Значения прикладываемых напряжений смещения менялись в диапазоне от 0 В до 0.75 В.

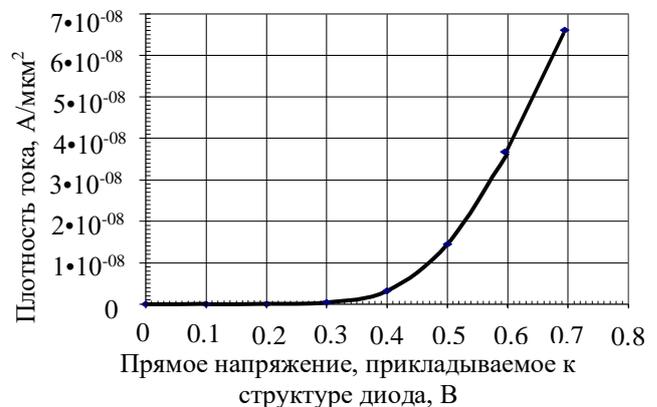


Рис. 3. Прямая ветвь ВАХ диода, полученная в результате приборного моделирования в условиях комнатной температуры с помощью программы MOD-1D

Последующее приборное моделирование диодной структуры было выполнено с применением программы

одномерного моделирования MOD-1D [8], позволившей сократить общие затраты машинного времени в 2 – 3 раза по сравнению затратами необходимыми для случая двухмерного моделирования. Результаты расчёта вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода показаны на рис. 3.

Известно, что плотность тока, протекающего через любую полупроводниковую структуру, зависит от её температуры, которая может меняться либо из-за разогрева р-п-перехода в результате протекания через него больших электрических токов, либо из-за изменений температуры окружающей среды. Температура окружающей среды оказывает существенное влияние на ВАХ диода. С изменением температуры несколько меняется ход как прямой, так и обратной ветви ВАХ. При увеличении температуры возрастает концентрация неосновных носителей в кристалле полупроводника, что приводит к росту обратного тока перехода, а также уменьшению объемного сопротивления области базы. С увеличением температуры уменьшается контактная разность потенциалов, энергия основных носителей заряда возрастает, соответственно растёт диффузионная составляющая тока и прямой ток увеличивается. Иначе говоря, при большей температуре р-п-перехода тот же прямой ток достигается при меньшем напряжении смещения.

При больших прямых токах нельзя пренебречь сопротивлением базы, которое с увеличением температуры растёт из-за снижения подвижности свободных носителей заряда. Таким образом, результирующая ВАХ диода при прямом смещении сложным образом зависит от температуры T . При малых токах, протекающих через диод, характеристика смещается с ростом T влево, а при больших токах (где влияние базы сильнее) – вправо. С ростом температуры увеличивается скорость тепловой генерации электронно-дырочных пар во всех областях р-п-перехода. Это приводит к резкому возрастанию с температурой концентрации неосновных носителей в п- и р- областях перехода и, следовательно, к увеличению тока насыщения и ухудшению выпрямляющих свойств диода. Следует отметить, что при некоторой температуре концентрация основных носителей заряда становится приблизительно равной концентрации неосновных носителей, и переход исчезает совсем. На рис. 4 показаны зависимости плотности тока, протекающего через исследуемый диод от температуры, рассчитанные с использованием MOD-1D [8] и построенные с помощью программы *Excel*.

Зависимости рассчитаны для значений прямого напряжения смещения, подаваемого на диод в интервале от 0 до 0.75 В и в диапазоне температур от 0 °С до 165 °С. Как видно из рис. 4, чем ниже уровень инжекции, тем сильнее зависит от температуры ток, протекающий через структуру диода. Например, когда напряжение, подаваемое на р-п-переход, составляет 0 В, при изменении температуры от 35 °С до 165 °С плотность тока диода растёт от 7×10^{-5} А/см² до 3×10^{-2} А/см², т. е. меняется почти на три порядка; при напряжении на переходе 0.3 В плотность тока увеличивается с 7×10^{-2} А/см² до 1 А/см², т. е. возрастает менее, чем на два порядка в том же диапазоне температур. Когда диод

открыт при прямом напряжении смещения, подаваемом на его структуру, 0.75 В, рост плотности тока в указанном диапазоне температур составляет уже менее одного порядка (с 2.5 А/см² до 5 А/см²).

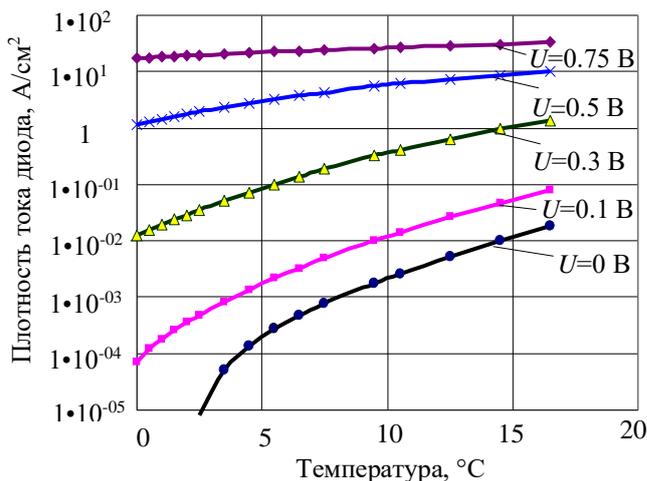


Рис. 4. Температурные зависимости плотности тока диода при различных значениях прямого напряжения смещения, подаваемого в диапазоне от 0 В до 0.75 В.

Таким образом, кремниевый р-п-переход, часто использующийся в качестве самого простого температурного датчика, максимально чувствителен к перепаду температур в условиях более низких уровней инжекции.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разработанной автором одномерной модели исследуемого в работе высоковольтного диода с пробивным напряжением в диапазоне от 120 до 150 В с целью выполнения его одномерного приборного моделирования с помощью программы MOD-1D (также разработанной автором) позволило снизить затраты машинного времени в 2 – 3 раза по сравнению затратами необходимыми для случая двухмерного моделирования. Приборное моделирование было выполнено после осуществления двухмерного технологического моделирования диода с помощью программы TSuprem4 программного комплекса фирмы Synopsys, позволившего оптимизировать параметры технологического маршрута изготовления. С применением MOD-1D выполнены предварительные оценочные расчёты прямой ветви вольт-амперной характеристики р-п-перехода диода, а также зависимости его плотности тока от температуры в диапазоне от 0 °С до 165 °С, определены тенденции изменения электрофизических параметров прибора для различных уровней инжекции и значений температуры. Установлено, что чем ниже уровень инжекции, тем сильнее зависит от температуры ток, протекающий через структуру диода, т. е. тем чувствительней к перепаду температур кремниевый р-п-переход, часто применяемый в качестве наиболее простого датчика температуры.

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] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Ч. 1. М.: Мир, 1984. 455 с.
- [4] Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.
- [5] Лоренц Л. Состояние и направления дальнейшего развития в сфере разработки производства и применения силовых полупроводниковых приборов // Электротехника. 2001. №12. С.2–12.
- [6] Лагунович Н.Л., Турцевич А.С., Борздов В.М. Моделирование влияния типа эпитаксиальной плёнки на электрические характеристики высоковольтных кремниевых диодов // Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2015. № 2. С. 98 – 102.
- [7] URL: <http://www.synopsys.com> (дата обращения: 05.11.2019)
- [8] Лагунович Н.Л. Компьютерная программа MOD-1D. Свидетельство о регистрации компьютерной программы 742 РБ, Зап. в Реестре зарегистрированных в Нац. центре интеллектуал. собственности комп. программ 10.03.15.
- [9] Польский Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. Рига: Зинатне, 1986. 167 с.
- [10] Gummel H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations // IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. V. ED-11. № 10. P. 455-465.
- [11] Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 532 с.
- [12] Кремлев В.Я. Физико-топологическое моделирование структур элементов БИС. М.: Высшая школа, 1990. 144 с.

High-Voltage Silicon Diode Simulation, the Dependences of Its Current Density from Temperature Construction

N.L. Lagunovich

Open Join-Stock Company “INTEGRAL”–“INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk,
n_dudarby@tut.by

Abstract — The aim of this work was developing the manufacturing process route and one-dimensional model of the high-voltage silicon diode with breakdown voltage in the range from 120 V to 150 V. The technological simulation was performed and main parameters of the manufacturing process were defined with help of the program TSuprem4 which is part of Synopsys software package. The fundamental system of semiconductor equations is in the base of one-dimensional model developed by the author. This model is efficient in terms of machine time costs. The device modeling diode was completed by means of the program MOD-1D, which was developed by the author and uses the above-mentioned model, and the dependence of the diode current density on the forward bias voltage applied to the investigated device structure was constructed. The program MOD-1D was used to calculate and construct temperature dependences of the diode current density for different injection levels in the temperature range from 0 °C to 165 °C. It was determined that there is a more noticeable increase of the device current density with an p-n-junction temperature raising at low injection levels than at high injection levels. Thus, diode is more sensitive to temperature differences at low bias voltages applied to the device p-n junction than in the case of higher forward voltages applied to diode structure. The type 2D695 diode investigated in this work was manufactured in the production conditions of Open Join-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company according to the technological route developed by the author.

Keywords — diode, forward voltage, process simulation, device simulation, current-voltage characteristic, temperature dependence, injection level.

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. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов. 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] Sze S. Physics of Semiconductor Devices. Part 1., New York: John Wiley & Sons, 2nd edition, 1981. 873 p. (Russ. ed.: Suris R.A. Fizika poluprovodnikovyyh priborov. Ch. 1., Moscow: Mir Publ., 1984. 455 p.) (in Russian).
- [4] 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).
- [5] Lorenz L. Sostoyanie i napravleniya dalneishego razvitiya v sfere razrabotki, proizvodstva i primeneniya silovyyh poluprovodnikovyyh priborov (Trends in power integration, state-of-the art and future) // Elektrotehnika, 2001. no.12, pp. 2-12 (in Russian).
- [6] Lagunovich N.L., Turtsevich A.S., Borzдов V.M. Modelirovanie vliyaniya tipa epitaksialnoi plyonki na elektricheskie harakteristiki vysokovoltnyh kremnievyyh 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, no.2, pp. 98 – 102 (in Russian).
- [7] URL: <http://www.synopsys.com> (access date: 05.11.2019)

- [8] Lagunovich N.L. Komp'uternaya programma MOD-1D – The computer program MOD-1D. Deposit-receipt RB, no. 742, 2015. (in Russian).
- [9] Polskiy B.S. Chislennoe modelirovanie poluprovodnikovih priborov - Numerical simulation of semiconductor devices, Riga, Zinatne Publ., 1986, 168 p. (in Russian).
- [10] Gummel H.K. A self consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations // IEEE Trans. Electron. Dev. 1964. V. ED-11, no10. P.455-465.
- [11] Samarskiy A.A., Nikolaev E.S. Metody resheniya setochnyh uravneniy - Methods of solving net equations, Moscow, Nauka Publ., 1978, 532 p. (in Russian).
- [12] Kremlyov V.Ya. Fiziko-topologicheskoe modelirovanie struktur elementov BIS - Physical and topological modeling structures of LSI elements, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 144 p. (in Russian).