

РАСЧЁТ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО n - p - n -ТРАНЗИСТОРА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. Л. Лагунович

ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Корженевского, 12,
220108 Минск, Беларусь, e-mail: n_dudarby@tut.by

При разработке и освоении новых изделий электронной техники часто бывает необходимо провести моделирование разрабатываемых изделий с целью предварительной оценки их конструктивно-технологических и электрофизических характеристик и параметров ещё до этапа изготовления их экспериментальных образцов. В связи с чем, важность и необходимость этапа моделирования полупроводниковых структур на сегодняшний день значительно возросли. В данной работе представлены результаты технологического моделирования высоковольтного n - p - n -транзистора средней мощности с пробивным напряжением коллектор-эмиттер более 80 В и максимальной рассеиваемой мощностью до 0,63 Вт, изготавливаемого по разработанному технологическому маршруту. В результате проектирования была получена структура прибора и определены такие его параметры, как глубины залегания p - n -переходов X_j , значения поверхностных сопротивлений областей p - и n -типов R_s , толщины защитных окислов d с достаточно приемлемой погрешностью 3,81–23,10 %.

Ключевые слова: n - p - n -транзистор; технологическое моделирование; технологический маршрут; ионное легирование; глубина залегания p - n -перехода; поверхностное сопротивление.

COMPUTATING CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE HIGH-VOLTAGE n - p - n -TRANSISTOR USING SIMULATION

N. L. Lagunovich

Open Join-Stock Company «INTEGRAL» – «INTEGRAL» holding managing company,
Korzhenevskii Str., 12, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: N. L. Lagunovich (n_dudarby@tut.by)

It is often necessary to carry out simulation of the products electronic being developed in order to preliminary assess their constructive-technological and electrical characteristics and parameters in the process of developing and mastering new electronic products even before the stage of manufacturing their experimental samples. In this connection, the importance and necessity of the modeling semiconductor structures stage has increased significantly today. Results of process simulation of the high-voltage medium-power n - p - n -transistor with a collector-emitter breakdown voltage of over 80 V and a maximum power dissipation of up to 0.63 W manufactured according to the developed process flow are presents in this paper. The structure of the device was obtained and its parameters were determined, such as its p - n -junctions depths X_j , surface resistances of the p - and n -type regions values R_s , protective oxides thickness d as a result of the modeling with a quite acceptable error of 3.81–23.10 %.

Key words: n - p - n -transistor; process simulation; process flow; ion-implantation doping; p - n - junction depth; surface resistance.

ВВЕДЕНИЕ

Как уже известно, в настоящее время моделирование полупроводниковых структур часто применяется в процессе проектирования новых изделий электронной техники [1–3], освоения их в серийном производстве, а также при оптимизации технологических маршрутов изготовления. Моделирование даёт возможность выполнить расчёты физико-топологических, электрофизических характеристик и параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) на их основе, позволяет значительно сократить количество натурных экспериментов. Биполярные транзисторы [4–6], несмотря на то, что почти полностью были вытеснены полевыми транзисторами в некоторых областях применения, достаточно широко используются на сегодняшний день как в дискретном исполнении, так и в составе ИС различного назначения. В данной статье речь пойдёт о моделировании высоковольтного биполярного *n-p-n*-транзистора средней мощности с пробивным напряжением коллектор-эмиттер ≥ 80 В и максимальной рассеиваемой мощностью до 0,63 Вт, предназначенного для применения в импульсных и переключающих устройствах. Таким образом, целью настоящей работы было выполнение двухмерного технологического проектирования кремниевого биполярного транзистора средней мощности, получаемого по разработанному технологическому маршруту. Программа для двухмерного технологического моделирования TSuprem4, входящая в состав программного комплекса фирмы Synopsys [7], позволила рассчитать конструктивно-технологические параметры указанного транзистора и определить характеристики режимов техпроцесса изготовления прибора, которые дают возможность получать требуемые значения размеров его конструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемый в данной статье биполярный транзистор является прибором с рассеиваемой мощностью до 0,63 Вт, допустимым максимальным током коллектора 0,5 А, с граничной частотой коэффициента передачи тока $f_{гр}$ до 200 МГц. Для создания приборных структур с $f_{гр}$ в диапазоне от 100 до 2000 МГц одним из наиболее благоприятных материалов является кремний [8], являющийся основным на производствах ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Кремниевые транзисторы средней и большой мощности были изготовлены на несколько лет позднее, чем германиевые, в 1956–1957 г.г. [8], из-за больших сложностей в получении совершенных монокристаллов Si. Однако, качество монокристаллического кремния и технологические методы формирования транзисторов на его основе непрерывно совершенствовались, а в ряде случаев кремниевые мощные транзисторы позволяли создавать схемы, где не могли быть применены приборы на основе германия. Таким образом, относительная роль мощных кремниевых транзисторов в микроэлектронике начала возрастать. Сегодня биполярные и полевые транзисторы на основе Si широко используются для создания гражданских и военных радарных систем, систем радио- и телепередающей аппаратуры, систем мобильной и стационарной связи, работающих в частотном диапазоне до 2 ГГц. Условия производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», где основным материалом, на котором формируются изделия электронной техники, является кремний, явились благоприятными для изготовления транзистора, исследованного в рамках данной статьи.

Во введении было сказано, что технологическое моделирование вертикальной структуры рассматриваемого транзистора и расчёт его конструктивно-технологических параметров были выполнены с применением программы TSuprem4, которая является частью программного комплекса TCAD фирмы Synopsys версии V-2003.12-0 [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный в рамках представляемых исследований технологический маршрут изготовления рассматриваемого $n-p-n$ -транзистора включал в себя следующие этапы формирования и технологические операции.

1. Выбор в качестве подложки кремниевой пластины n^+ -типа с высокой степенью легирования сурьмой, с выращенной на ней эпитаксиальной плёнкой n -типа легированной фосфором толщиной $(22,5 \pm 2,5)$ мкм с удельным сопротивлением $\rho_v = (12,5 \pm 2,5)$ Ом $\times$ см.

2. Формирование в эпитаксиальной плёнке области базы p -типа посредством ионного легирования бором и его последующей разгонки.

3. Формирование области охранного кольца по периметру прибора и эмиттера n^+ -типа путём диффузионного легирования фосфором.

4. Нанесение межслойного среднетемпературного фосфоросиликатного стекла (СТФСС) и формирование в нем контактных окон.

5. Напыление алюминия (Al) толщиной $(3,0 \pm 0,3)$ мкм для формирования контактов к областям базы и эмиттера.

6. Осаждение низкотемпературного фосфоросиликатного стекла (НТФСС) для формирования защитного пассивирующего слоя.

7. Уменьшение толщины пластины до (270 ± 20) мкм и ионное легирование фосфором её обратной стороны.

С помощью программы TSuprem4 было выполнено технологическое моделирование в соответствии с приведенным выше техпроцессом изготовления и получена двумерная структура $n-p-n$ -транзистора, которая изображена на рис. 1.

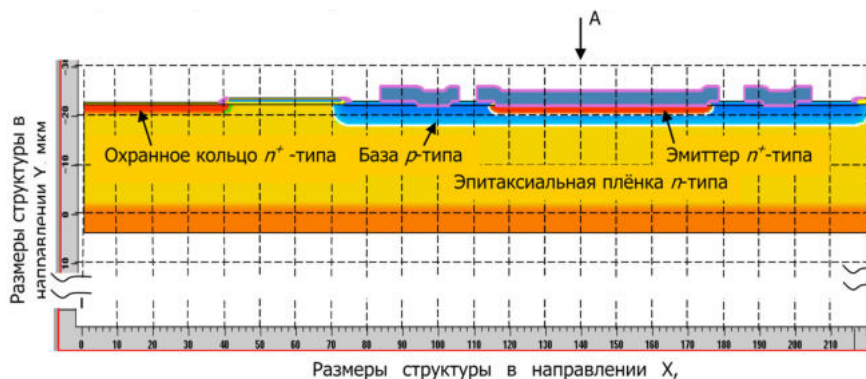


Рис. 1. Вертикальная структура кремниевого $n-p-n$ -транзистора средней мощности, полученная в результате моделирования

На рис. 2 приводится одномерное распределение примесей по структуре вдоль оси Y в направлении сечения А, показанного на рис. 1. Из рис. 2 легко определить профили распределения легирующих примесей, их концентрации в каждой точке сечения А, особенности и тенденции изменения таких распределений, глубины залегания p - n -переходов.

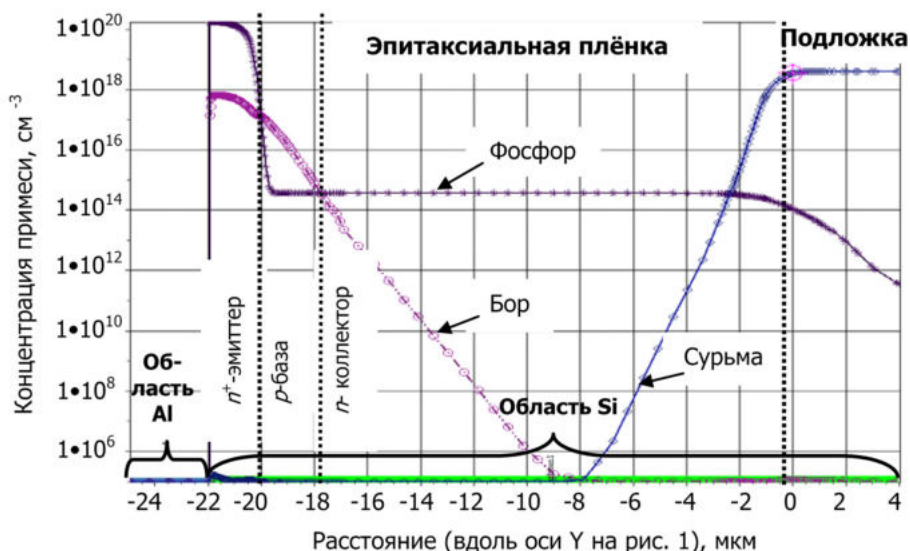


Рис. 2. Распределения примесей по структуре кремниевого n - p - n -транзистора средней мощности вдоль сечения А, показанного на рис. 1

Следует отметить, что проектирование приведенной области транзистора было затруднено из-за большого размера выбранного участка, который составил в длину (вдоль оси X на рис. 1) 220 мкм, а в глубину (вдоль оси Y на рис. 1) около 27 мкм. Общая площадь сечения, полученного при моделировании, составила 220 мкм×27 мкм = 5940 мкм². Таким образом, из-за сравнительно большой выбранной моделируемой части прибора необходимо было ввести достаточно большое количество узлов сетки, на которую она разбивалась в процессе вычислений, с целью получения приемлемой точности расчётов. Было задано максимально возможное для процесса технологического проектирования количество узлов сетки (100000) в среде программы Tsuprem4 с помощью команды mesh, что позволило обеспечить сходимость итерационного процесса и выполнить поставленную задачу. Однако, затраты машинного времени на решение такой проблемы составили несколько суток.

Имеющиеся в конструкторской документации (КД) требования к значениям конструктивно-технологических параметров исследуемого n - p - n -транзистора и их величины, полученные в результате моделирования, сведены в единую табл., где также в процентном соотношении представлены различия между требуемыми и расчётными данными. Из табл. видно, что полученные при расчётах параметры конструкции исследуемого прибора соответствуют требованиям документации с достаточно приемлемой точностью.

Значения конструктивно-технологических параметров n – p – n -транзистора, полученные как в результате моделирования, так и взятые из КД на проектируемый транзистор

Наименования конструктивно-технологических параметров Элементы структуры	Толщина d (глубина p – n -перехода X_j), мкм			Поверхностное сопротивление, R_s , Ом/		
Наименование	Значения из КД	Расчётные значения	Разница между расчётной величиной и значением из КД, %	Значения из КД	Расчётные значения	Разница между расчётной величиной и значением из КД, %
База p -типа	$4,2 \pm 0,4$	4,04	3,81	280 ± 30	341,0	17,89
Эмиттер n^+ -типа	$2,4 \pm 0,3$	1,92	20,00	$5,0 \pm 1,0$	4,1	18,00
Оксид защитный 1	$0,6 \pm 0,1$	0,71	15,50	–	–	–
Оксид защитный 2	$0,30 \pm 0,03$	0,39	23,10	–	–	–

В частности, рассчитанная глубина залегания p – n -перехода база-эпитаксиальный слой X_j в структуре исследованного n – p – n -транзистора соответствует требованиям документации с точностью 3,81 %. Значение поверхностного сопротивления p -базы транзистора R_s , полученное в процессе моделирования, с точностью 17,89 % соответствует требованиям конструкторской документации. Соответствие требованиям документации расчётной величины X_j эмиттера n^+ -типа составило 20,00 %, а расчётного значения R_s эмиттера – 18,00 %. С точностью 15,50 % расчётная величина толщины d защитного окисла 1 соответствует требованиям КД, а значение d защитного окисла 2, полученное при моделировании, оказалось менее удовлетворительным и имело отклонение от требований документации 23,10 %.

Полученная в процессе вычислений точность значений конструктивно-технологических параметров является вполне приемлемой и достаточной для того, чтобы изготовить первые экспериментальные образцы прибора, поскольку разработанный технологический процесс, по которому формировался исследуемый n – p – n -транзистор, находился только на стадии проектирования. Как правило, на этапе моделирования не всегда удаётся точно оценивать параметры полупроводниковых приборов и их областей с первого раза. Однако, численный эксперимент даёт возможность получать какие-то предварительные их значения и уточнять их в процессе освоения прибора в серийном производстве, дополнив процедуру разработки натурными экспериментами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс моделирования технологического маршрута изготовления транзистора n – p – n -типа позволил определить расчётные значения толщин d защитных окислов на указанной структуре, поверхностные сопротивления R_s её областей и глубины залегания p – n -переходов X_j . Полученные на этапе моделирования погрешности вычисле-

ний, с которыми рассчитанные толщины окислов d , поверхностные сопротивления R_s областей p - и n -типа, глубины залегания p - n -переходов X_j исследуемого прибора соответствуют требованиям КД, можно считать удовлетворительными. Отсюда следует вывод о том, что разработанный в рамках данной работы маршрут изготовления, применяемый при формировании высоковольтного n - p - n -транзистора средней мощности, позволяет получать приборы с требуемыми конструктивно-технологическими параметрами, которые в дальнейшем могут быть использованы для вычислений электрофизических характеристик и параметров исследуемой транзисторной структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / 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 – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 152 с.
3. Приборно-технологическое проектирование элементной базы мощной СВЧ-электроники: Учебно-методическое пособие / Р. П. Алексеев [и др.]; под ред. И. Г. Валинкина. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2016. – 70 с.
4. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах / С. Зи. – Кн. 1. Пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
5. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
6. Петухов В.М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности, сверхвысокочастотные и их зарубежные аналоги. Справочник / В. М. Петухов. – Т. 4 – М.: КУБК-а, 1997. – 544 с.
7. URL: <http://www.synopsys.com> (дата обращения: 29.07.2024).
8. Мазель, Е.З. Мощные транзисторы / Е.З. Мазель – М.: «ЭНЕРГИЯ», 1969. – 280 с.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО КОБАЛЬТИТА КАЛЬЦИЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ЧАСТИЦАМИ МАРГАНЦА

Р. С. Латыпов, А. И. Клындюк

*Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Беларусь, e-mail: latypov@belstu.by*

Керамическим методом синтезированы композиционные оксидные термоэлектрические материалы состава $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_{9+\delta} + 3 \text{ мас.}\% \text{ Mn}$. Изучено влияние введения частиц марганца на электротранспортные (удельная электропроводность, коэффициент термо-ЭДС) и функциональные характеристики (фактор мощности) полученных композиционных материалов. Проанализирована эффективность модификации слоистого кобальтита кальция частицами Mn по сравнению с частицами Fe, Co, Ni и Cu.

Ключевые слова: слоистый кобальтит кальция; композиционные термоэлектрики; фазовая неоднородность; двухстадийное спекание.