

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 621.382.2.027.7(047)(470)

Н. Л. ЛАГУНОВИЧ¹, А. С. ТУРЦЕВИЧ¹, В. М. БОРЗДОВ²**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ**¹Открытое акционерное общество «ИНТЕГРАЛ»,²Белорусский государственный университет

(Поступила в редакцию 06.02.2015)

Введение. Моделирование полупроводниковых структур [1, 2] играет важную роль в процессе разработки и производства новых изделий микроэлектроники, поскольку позволяет определять параметры технологического процесса изготовления исследуемой структуры и получать ее вольт-амперные характеристики еще до этапа изготовления экспериментальных образцов. В то же время моделирование не исключает полностью этап изготовления экспериментальных образцов, но позволяет значительно снизить количество натуральных экспериментов и таким образом уменьшить затраты на их проведение.

В настоящее время различные типы диодов [3–5] находят широкое применение как в качестве дискретных приборов, так и в качестве элементов интегральных микросхем различного назначения. В данной работе проведено приборно-технологическое моделирование кремниевого диода, диаметр активной области которого составляет 150 мкм. При этом для оценки степени влияния толщины и удельного электрического сопротивления эпитаксиальной пленки на значения конструктивных параметров и электрические характеристики диодных структур рассчитаны прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики исследуемого прибора при его формировании в эпитаксиальных пленках следующих трех типов: 17,0КЭФ2,0 (кремний, легированный фосфором, электронного типа проводимости толщиной $d = 17,0$ мкм с удельным электрическим сопротивлением $\rho_v = 2,0$ Ом·см); 25,0КЭФ6,0 ($d = 25,0$ мкм, $\rho_v = 6,0$ Ом·см); 25,0КЭФ20,0 ($d = 25,0$ мкм, $\rho_v = 20,0$ Ом·см). Диоды, формируемые в эпитаксиальных пленках указанных типов, как правило, являются высоковольтными приборами с пробивными напряжениями свыше 100 В (для пленки 17,0КЭФ2,0) и свыше 250 В (для пленок 25,0КЭФ6,0 и 25,0КЭФ20,0).

Моделирование технологического процесса и электрических характеристик исследуемого диода осуществлялось с использованием программного комплекса фирмы Synopsys, включающего в себя программы двумерного технологического моделирования TSuprem4 и двумерного приборного моделирования полупроводниковых структур Medici [6].

Выбор и моделирование технологических маршрутов изготовления диода. Задачи, решаемые в данной работе, – определение параметров технологического процесса изготовления высоковольтных кремниевых диодов и оценка влияния типа эпитаксиальной пленки на значения некоторых конструктивных параметров исследуемых приборов. Технологический маршрут изготовления рассматриваемого высоковольтного кремниевого диода включал в себя следующие операции:

выбор в качестве подложки пластины 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 <111>);

формирование эпитаксиальной пленки трех типов: 17,0КЭФ2,0; 25,0КЭФ6,0; 25,0КЭФ20,0;

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 ($D = 1,56 \times 10^{15}$ ион/см², энергия $E = 60$ кэВ);

разгонка бора при 1200 °С 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 °С в течение 30 мин в среде O₂;

ионное легирование (подлегирование) бором ($D = 1,875 \cdot 10^{15}$ ион/см², энергия $E = 30$ кэВ) с целью формирования омического контакта к области *p*-типа;

утонение пластины до 180 мкм;

напыление металла для формирования контактов к областям *p*-типа.

Для ускорения процедуры расчетов моделирование структуры диаметром 150 мкм заменено моделированием структуры с меньшей площадью (4 мкм × 1 мкм = 4 мкм²). Моделирование технологических маршрутов исследуемого диода проводилось с помощью программы двухмерного технологического моделирования TSuprem4. На рис. 1 показаны полученные в результате моделирования структуры высоковольтного диода, изготовленные в трех различных типах эпитаксиальных пленок.

Расчетные значения параметров конструкции диодной структуры приведены на рис. 1 и в табл. 1. Глубина залегания *p-n*-перехода X_j структуры (рис. 1, *a*) составила 9,76 мкм, поверхностное сопротивление ее области *p*-типа R_s равно 42,7 Ом/кв, толщина осажденного окисла $D_{ост} = 419,0$ нм. Глубина залегания X_j структуры, показанной на рис. 1, *б*, составляет 10,44 мкм, $R_s = 42,4$ Ом/кв, $D_{ост} = 419,0$ нм. Глубина залегания X_j структуры, показанной на рис. 1, *в*, составляет 11,24 мкм, $R_s = 44,2$ Ом/кв, $D_{ост} = 419,0$ нм (табл. 1). 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

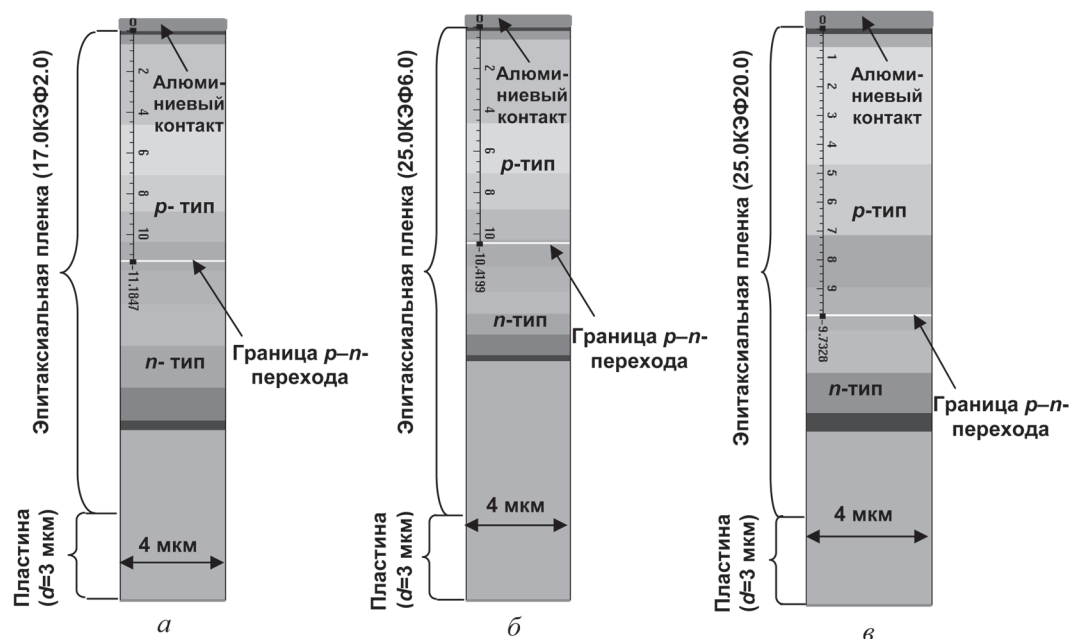


Рис. 1. Диодные структуры, изготовленные в различных типах эпитаксиальных пленок: 17,0КЭФ2,0 (*a*); 25,0КЭФ6,0 (*б*) и 25,0КЭФ20,0 (*в*)

пленку 25.0КЭФ6.0 и ее последующей разгонки; глубины залегания p - n -перехода X_j в указанной эпитаксиальной пленке. Типовые значения являются результатом усреднения величин, полученных после многократно выполненных измерений (не менее 25). Расчетные значения $D_{\text{ост}}$, R_s и X_j , определенные после моделирования технологического процесса изготовления исследуемого высоковольтного диода, сравнивались с их типовыми значениями. Как видно из табл. 1, разница между экспериментальными и расчетными данными составляет не более $\pm 10\%$, что говорит о хорошем согласии результатов моделирования с данными измерений и о корректности выбранного технологического маршрута изготовления.

Таблица 1. Расчетные значения толщины остаточного окисла $D_{\text{ост}}$, поверхностного электрического сопротивления R_s , глубины залегания p - n -перехода X_j после разгонки области p -типа диодов, полученных с применением трех типов эпитаксиальной пленки

Тип эпитаксиальной пленки	Толщина остаточного окисла $D_{\text{ост}}$, нм	Поверхностное сопротивление R_s , Ом/кв	Глубина залегания p - n -перехода X_j , мкм
Типовое значение*	450	40,0	9,5
17,0КЭФ2,0	419	42,7	9,8
25,0КЭФ6,0	419	42,4	10,4
25.0КЭФ20.0	419	44,2	11,2

* Величины типовых значений приведены для эпитаксиальной пленки 25,0КЭФ6,0.

Обсуждение результатов моделирования электрических характеристик диода. Приведенный краткий маршрут изготовления исследуемого диода обеспечивает получение требуемых конструктивно-технологических параметров прибора, которые в свою очередь должны обеспечить получение его заданных электрических параметров и характеристик. Моделирование электрических характеристик структур, показанных на рис. 1, проводилось с помощью программы Medici. Результаты расчета электрических характеристик диода приведены на рис. 2 и в табл. 2. На рис. 2, *а, б, в* представлены графические зависимости электрического тока, протекающего через p - n -переход диодных структур, изображенных на рис. 1, *а, б, в*, от значений электрического напряжения при прямом напряжении смещения на диоде. Для диода, изготовленного в эпитаксиальной пленке 17,0КЭФ2,0, расчетное значение прямого падения электрического напряжения $U_{\text{прям}}$ составило 0,86 В, в эпитаксиальной пленке 25,0КЭФ6,0 – 0,88 В; в эпитаксиальной пленке 25,0КЭФ20,0 – 0,88 В при одинаковых значениях электрического тока 100 мА (табл. 2, рис. 2, *а, б, в*).

На рис. 2, *г, д, е* приведены зависимости электрического тока, протекающего через p - n -переход диодных структур, показанных на рис. 1, *а, б, в*, от электрического напряжения при подаче обратного напряжения смещения на диод. Значение пробивного напряжения $U_{\text{проб}}$ моделируемого диода в эпитаксиальной пленке 17,0КЭФ2,0 составило 124 В, в эпитаксиальной пленке 25,0КЭФ6,0 – 270 В, в эпитаксиальной пленке 25,0КЭФ20,0 – 266 В при одинаковых значениях электрического тока 10 мкА (табл. 2, рис. 2, *г, д, е*).

При моделировании рассматривалась структура, в составе которой учитывалась полная толщина эпитаксиальной пленки, выращенной на подложке толщиной 3 мкм (вместо подложки толщиной 180 мкм, получаемой после утонения пластины). Такое уменьшение толщины обусловлено максимально допустимым в программе для технологического моделирования TSuprem4 количеством узлов сетки (40000), на которые разбивается моделируемая структура, и необходимостью снижения затрат машинного времени. Вклад электрического сопротивления подложки толщиной 180 мкм с $\rho_V = 0,01$ Ом·см в общее электрическое сопротивление структуры, состоящей из области p -типа, эпитаксиального слоя и подложки, составляет 1 Ом. Прямое падение электрического напряжения на таком электрическом сопротивлении при величине тока 100 мА составляет 0,1 В. При этом расчетная величина $U_{\text{прям}}$ с учетом всей толщины подложки (180 мкм) оказывается равной 0,96 В для эпитаксиальной пленки 17,0КЭФ2,0, 0,98 В – для пленки 25,0КЭФ6,0 и 0,98 В – для пленки 25,0КЭФ20,0. Как показали расчеты, значение прямого падения электрического напряжения на p - n -переходе незначительно зависит от типа эпитаксиальной структуры.

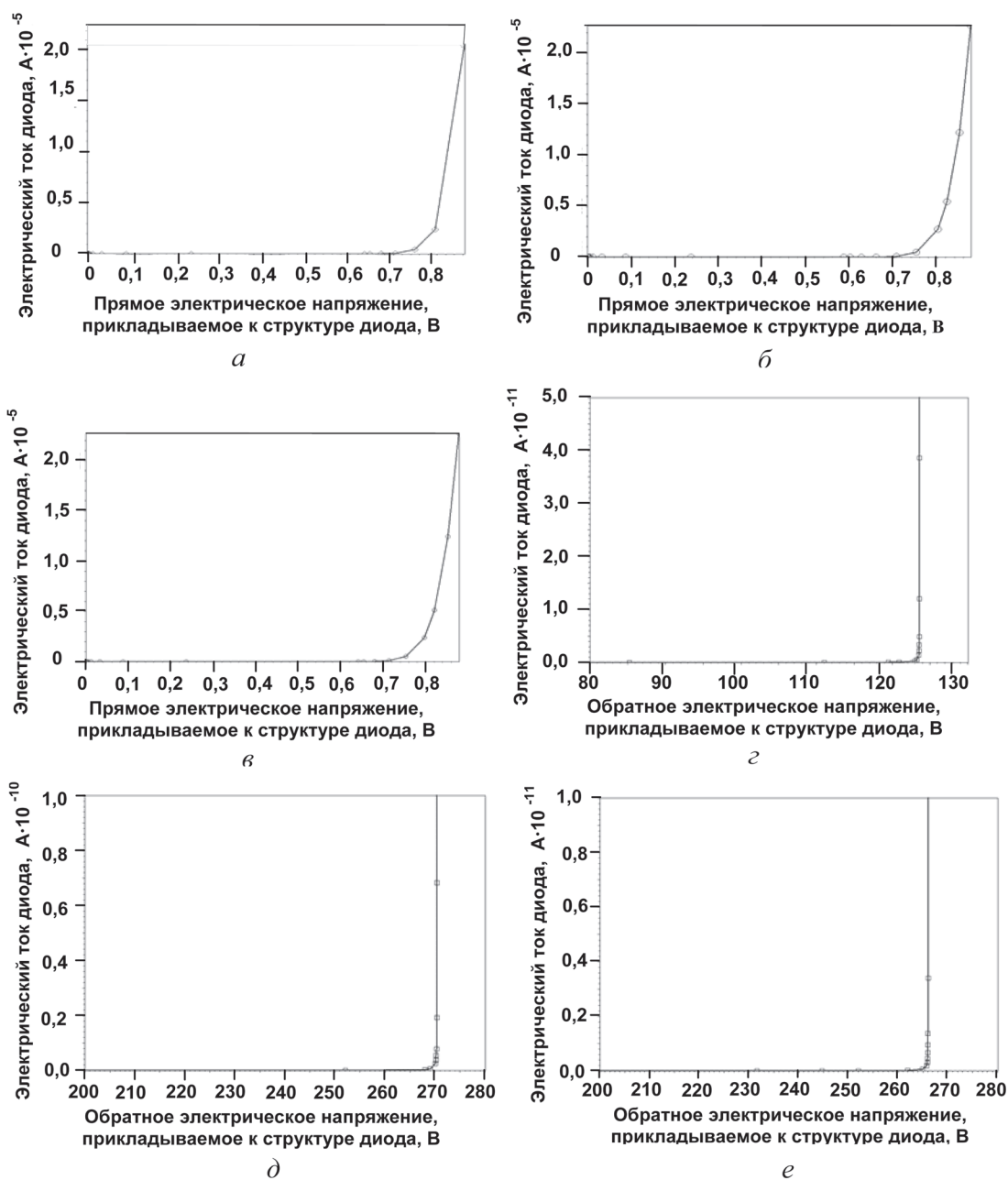


Рис. 2. Прямые (*a*, *б*, *в*) и обратные (*г*, *д*, *е*) ветви ВАХ диодов, полученных в эпитаксиальных пленках различных типов: 17,0КЭФ2,0 (*a*, *г*); 25,0КЭФ6,0 (*б*, *д*); и 25,0КЭФ20,0 (*в*, *е*)

Таблица 2. Расчетные значения прямого падения электрического напряжения на диоде $U_{\text{прям}}$ при электрическом токе диода 100 мА, электрического напряжения пробоя диода $U_{\text{проб}}$ при электрическом токе диода 10 мкА, полученные в конструкциях с тремя типами эпитаксиальной пленки

Тип эпитаксиальной пленки	Прямое падение электрического напряжения $U_{\text{прям}}$, В	Электрическое напряжение пробоя $U_{\text{проб}}$, В
17,0КЭФ2,0	0,86	124,00
25,0КЭФ6,0	0,88	270,00
25,0КЭФ20,0	0,88	266,00

Как было отмечено выше, из-за ограничений, присущих использовавшемуся программному обеспечению (максимально допустимое количество узлов сетки при моделировании не более 40000), а также с целью уменьшения затрат машинного времени вместо структуры с диаметром активной области 150 мкм моделировалась структура с небольшой площадью (4 мкм²). Радиус

активной области p - n -перехода диода составлял 75 мкм, поэтому общая площадь его активной структуры равна $\pi(75)^2$ мкм² $\approx 17671,5$ мкм². Значение электрического тока, равное 100 мА, через прибор площадью 17671,5 мкм² соответствует значению электрического тока $2,264 \cdot 10^{-5}$ А через прибор площадью 4 мкм², а электрический ток 10 мкА, протекающий через прибор, площадь которого составляет 17671,5 мкм², соответствует значению прямого падения электрического напряжения на диоде $U_{\text{прям}}$, определяемому при токе $2,264 \cdot 10^{-5}$ А (рис. 2, а, б, в), а значения пробивного напряжения $U_{\text{проб}}$ определялись при токе $2,264 \cdot 10^{-9}$ А (рис. 2, г, д, е).

Можно также отметить, что полученные в результате расчетов значения конструктивных параметров структуры, электрических характеристик и параметров диода хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Заключение. Проведено моделирование технологических маршрутов изготовления и электрических характеристик высоковольтной кремниевой диодной структуры для трех типов эпитаксиальных пленок, использующихся в производстве: 17КЭФ2,0; 25,0КЭФ6,0; 25,0КЭФ20,0. Полученные расчетные данные хорошо согласуются с результатами эксперимента. Установлено, что параметры эпитаксиальной пленки не оказывают существенного влияния на толщину выращенного на них окисла и значения прямого падения электрического напряжения на исследованном диоде. Существенное влияние параметры эпитаксиальной пленки оказывают на величины поверхностного сопротивления, глубины залегания p - n -перехода и пробивного электрического напряжения диода.

Литература

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти и др.: Пер. с англ. М., 1988.
2. Абрамов И. И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. М., 2005.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. / Пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд. М., 1984. Кн. 1.
4. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М., 1989.
5. Шур М. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. М., 1992, Кн. 1.
6. <http://www.synopsys.com>.

N. L. LAGUNOVICH, A. S. TURTSEVICH, V. M. BORZDOV

SIMULATION OF INFLUENCE OF EPITAXIAL FILM TYPE ON ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-VOLTAGE SILICON DIODES

Summary

The device-process simulation of the high-voltage silicon diode was performed at its forming in three types of epitaxial film: 1) 17.0SEPh2.0 (silicon doped phosphor of electron type conductivity with the thickness $d = 17$ μm and resistivity of $\rho_v = 2.0$ Ohm·sm); 2) 25.0SEPh6.0 ($d = 25.0$ μm , $\rho_v = 6.0$ Ohm·sm); 3) 25.0SEPh20.0 ($d = 25.0$ μm , $\rho_v = 20.0$ Ohm·sm). Technological process parameters of diode structure making were defined and its design data was calculated for three types of epitaxial film, the comparison of calculated values with typical ones obtained experimentally was carried out. It was determined that the difference between calculated values and typical ones obtained by experiment is not more than $\pm 10\%$. The device modeling of diode was performed and it was investigated how the thickness and resistivity of epitaxial film influence on structural and electrical features of diode.