

Методика расчёта распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных ячеек в мощных кремниевых ВЧ и СВЧ LDMOS транзисторах

Ерохин С. А., Бачурин В. В., Бычков С. С., Романовский С. М.

Предложены модель структуры и методика расчёта распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных ячеек в мощных кремниевых ВЧ и СВЧ LDMOS транзисторах. Оценён относительный вклад распределённого сопротивления элементарных ячеек в общее сопротивление сток-исток СВЧ LDMOS транзистора в открытом состоянии.

Введение

В [1] разработаны модель структуры и методика расчёта распределённого сопротивления высоколегированного истокового p^+ -слоя подложки в мощных LDMOS транзисторах, у которых металлические электроды истока элементарных ячеек через предварительно вытравленные в высокоомном эпитаксиальном p^- -слое кремниевой p^-p^+ -подложки сквозные канавки замыкаются непосредственно на общий высоколегированный истоковый p^+ -слой транзисторной LDMOS-структуры. В данной модели объём растекания носителей заряда в высоколегированном истоковом p^+ -слое элементарных ячеек представлен в виде обелиска, трапецеидальные боковые грани которого, контактирующие с короткими и длинными сторонами его верхнего прямоугольного основания, наклонены по отношению к вертикали под одинаковым и строго определённым углом β .

Настоящая работа посвящена анализу распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных LDMOS-ячеек, отличного от [1] конструктивно-технологического исполнения (рис. 1), положенного в основу большинства современных промышленных типонаминов мощных кремниевых ВЧ и СВЧ LDMOS транзисторов, в том числе изделий BLF2022-90 и BLF2022S-90 фирмы «Philips» с диапазоном рабочих частот 2000–2200 МГц [2, 3]. Аналогичные публикации в отечественной и зарубежной технической литературе отсутствуют.

Тестовые структуры

Для моделирования и непосредственного измерения распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных ячеек LDMOS транзисторов использовался тот же, разработанный в [1], комплект тестовых структур, состоящий из одной автономной (рис. 1) и совокупности соединённых в параллель (рис. 2) p^+ -ячеек. Тестовые структуры изготавливались в составе одной пластины в едином технологическом процессе. Исходным материалом в данном случае служили не монокристаллические кремниевые p^- -подложки, а эпитаксиальные p^-p^+ -структуры кремния. Удельное сопротивление и толщина высокоомного эпитаксиального p^- -слоя кремниевых структур составляли соответственно $\rho_{p^-} = 10,612$ Ом·см и $H_{p^-} = 6,65$ мкм, а толщина и удельное сопротивление высоколегированного p^+ -слоя подложки – $H_{p^+} = 370$ мкм и $\rho_{p^+} = 0,03$ Ом·см. Технологический процесс изготовления тестовых структур с толщиной истоковой p^+ -перемычки $h_{p^+} = 6,95$ мкм включал: выращивание защитного слоя диоксида кремния на лицевой стороне исходных кремниевых p^-p^+ -подложек; вскрытие прямоугольных контактных окон в защитном диоксиде кремния с размерами сторон $d = 11,5$ мкм и $\ell = 85$ мкм; формирование истоковых диффузионных

p^+ -перемычек в высокоомном эпитаксиальном p^- -слое подложки посредством предварительной диффузионной загонки бора из твёрдого источника BN в эпитаксиальный p^- -слой подложки через вскрытые в защитном диоксиде кремния контактные окна при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$ в течение 40 минут и последующего диффузионного перераспределения внедрённой примеси при той же температуре в течение 2-х часов; дополнительное подлегирование приконтактной области кремния во вскрытых окнах диффузией бора из твёрдого источника BN при $T = 1100^\circ\text{C}$ до концентрации $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; напыление алюминия на лицевую сторону подложки; формирование из напылённого алюминия методом фотолитографии топологического рисунка тестовых структур, каждая из которых имела свою собственную контактную площадку для присоединения к ней внешних проволочных Al выводов диаметром 30 мкм; вжигание Al в Si при $T = 420^\circ\text{C}$ в течение 20 минут в среде азота. Истоковые диффузионные p^+ -перемычки элементарных ячеек толщиной $h_{p^+} = 4,95 \text{ мкм}$ создавались посредством стравливания $\sim 1,7 \text{ мкм}$ эпитаксиального p^- -слоя кремния во вскрытых в диоксиде кремния контактных окнах до загонки бора в эпитаксиальный p^- -слой подложки [4]. Изготовленные тестовые структуры резались на кристаллы и монтировались в металлокерамический корпус. Металлический электрод на тыльной стороне тестовой структуры создавался при напайке кристалла на фланец металлокерамического корпуса с помощью золотой прокладки.

Модель распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных LDMOS-ячеек

Поперечное сечение фрагмента одной и совокупности соединённых в параллель элементарных транзисторных LDMOS-ячеек изображено на рисунках 1 и 2, где штриховыми линиями ограничены контуры моделируемого истокового p^+ -узла ячеек. Входящие в состав истокового p^+ -узла элементарных ячеек диффузионные истоковые p^+ -перемычки (рис. 1) и граничащие с ними участки нижнего высоколегированного p^+ -слоя кремниевой подложки в данных моделях представлены соответственно в виде прямоугольного параллелепипеда и обелиска. Верхняя и нижняя грани параллелепипеда и верхняя грань обелиска соответствуют площади контактирования металлического электрода истока элементарных ячеек с диффузионными истоковыми p^+ -перемычками (рис. 1). Боковые грани прямоугольного параллелепипеда по высоте эквивалентны толщине истоковых диффузионных p^+ -перемычек h_{p^+} . Распределённое сопротивление участков высоколегированного истокового p^+ -слоя подложки $R_{p^+\text{под}}$, расположенных под истоковыми диффузионными p^+ -перемычками элементарных ячеек, моделировалось аналогично [1] в виде обелиска и рассчитывалось по той же методике. Контактное сопротивление между Al металлизацией и высоколегированной приповерхностной областью диффузионных

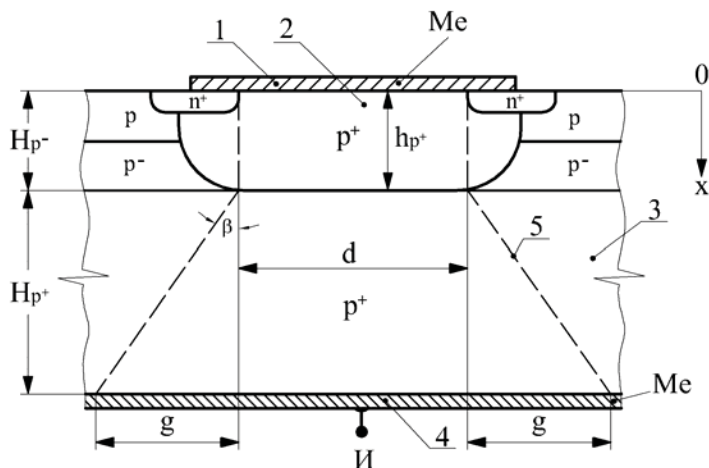


Рис. 1
Поперечное сечение фрагмента элементарной транзисторной LDMOS-ячейки:
1 - металлический электрод истока;
2 - истоковые p^+ -перемычки;
3 - высоколегированный истоковый p^+ -слой подложки; 4 - общий металлический электрод истока транзисторной LDMOS-структуры;
5 - контуры моделируемого истокового p^+ -узла LDMOS-ячейки

истоковых p^+ -перемычек с концентрацией дырок $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ для одной элементарной ячейки составляло (0,002 ... 0,004) Ом [1] и его вклад в общее сопротивление истокового p^+ -узла LDMOS-ячеек из-за незначительной величины в данном случае не учитывался.

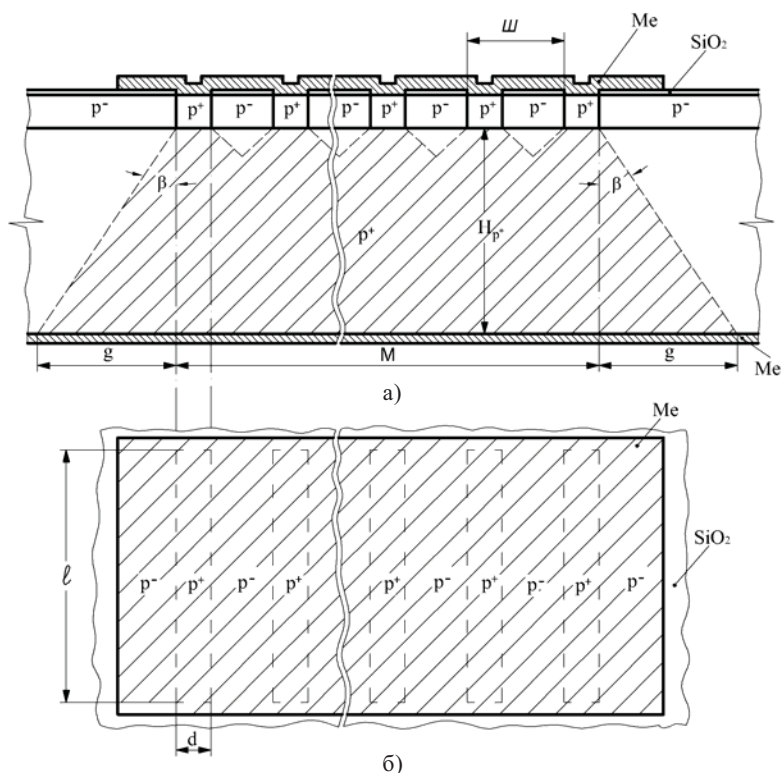


Рис. 2

Модели и фрагмент топологии тестовых структур, использованные для расчёта распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных транзисторных LDMOS-ячеек

Методика расчёта распределённого сопротивления диффузионных истоковых p^+ -перемычек и истокового p^+ -узла элементарных LDMOS-ячеек в целом

Разработанный алгоритм количественной оценки распределённого сопротивления диффузионных истоковых p^+ -перемычек элементарных LDMOS-ячеек включал разделение прямоугольного параллелепипеда, моделирующего распределённое сопротивление диффузионной истоковой p^+ -перемычки единичной элементарной транзисторной LDMOS-ячейки, на ряд более мелких, одинаковых по размеру ($l, d, \Delta h_{p^+}$), последовательно расположенных в направлении x , перпендикулярном лицевой поверхности исходной кремниевой p^-p^+ -подложки, прямоугольных параллелепипедов с высотой боковых граней $\Delta h_{p^+} \ll h_{p^+}$ ($\Delta h_{p^+} = 0,25 \text{ мкм}$) или непосредственное измерение реального профиля распределения легирующей примеси в изготовленных тестовых p^+ -структурах в направлении x , перпендикулярном лицевой поверхности подложки. На рис. 3 представлен реально измеренный профиль распределения бора $N_b(x)$ в кремниевых p^-p^+ -пластинах, использованных для изготовления тестовых структур, после диффузионной загонки бора из BN в высокоомный эпитаксиальный p^- -слой исследуемых пластин при $T = 1100^\circ\text{C}$ в течение 40 минут и последующего диффузионного перераспределения внедрённой примеси при той же температуре в течение 2-х часов. Измерения проводились на масс-спектрометре IMS-4f фирмы CAMECA (Франция). Регистрировались оба изотопа бора. Концентрация, соответствующая носителям, представляет собой сумму распределений изотопов. На основе полученного профиля распределения рассчитывались:

1. подвижности носителей заряда $\mu_p(x)$ в каждом последовательно расположенном прямоугольном параллелепипеде, исходя из усреднённого для конкретного параллелепипеда значения легирующей примеси $N_B(x)$, по обобщённому аналитическому соотношению [5, 6, 7]

$$\mu_p = \mu_0 \cdot \left(\frac{N_0}{N_B} \right)^{1/3} = 500 \cdot \left(\frac{10^{16}}{N_B} \right)^{1/3}, \left[\frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{сек}} \right]; \quad (1)$$

2. удельное сопротивление полупроводникового материала $\rho_p(x)$ в каждом последовательно расположенном прямоугольном параллелепипеде, исходя из ранее вычисленных для конкретного параллелепипеда значений $N_B(x)$ и $\mu_p(x)$, по известному соотношению

$$\rho_p = (q \cdot \mu_p \cdot N_B)^{-1} = 6,24 \cdot 10^{18} \cdot (\mu_p \cdot N_B)^{-1}, [\text{Ом} \cdot \text{см}]; \quad (2)$$

3. распределённое сопротивление составной доли единичной истоковой диффузионной p^+ -перемычки, заключённой в каждом последовательно расположенном прямоугольном параллелепипеде, исходя из её габаритов ($\ell, d, \Delta h_{p^+}$) и вычисленного ранее для конкретного параллелепипеда значения удельного сопротивления полупроводникового материала ρ_p , по соотношению

$$\Delta R_{p \text{ пер}}(x) = \frac{\Delta h_{p^+} \cdot \rho_p}{\ell \cdot d} = \frac{0,25 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_p}{11,5 \cdot 85 \cdot 10^{-8}} = 2,5575 \cdot \rho_p, [\text{Ом}]; \quad (3)$$

4. общее распределённое сопротивление единичной диффузионной истоковой p^+ -перемычки посредством суммирования распределённых сопротивлений её составляющих

$$R_{p \text{ пер}}(I) = \Sigma R_{p \text{ пер}}(x), [\text{Ом}]; \quad (4)$$

5. распределённое сопротивление n -го количества соединённых в параллель идентичных истоковых диффузионных p^+ -перемычек по соотношению

$$R_{p \text{ пер}}(n_{\text{яч}}) = \frac{R_{p \text{ пер}}(I)}{n_{\text{яч}}}, [\text{Ом}], \quad (5)$$

где $n_{\text{яч}}$ – количество элементарных ячеек в транзисторной LDMOS-структуре.

На рис. 3 также представлены рассчитанные значения составных долей $R_{p \text{ пер}}^*(x)$ для единичной истоковой p^+ -перемычки СВЧ LDMOS транзистора BLF2022-90 [3], обладающего идентичным с тестовыми структурами профилем распределения легирующей примеси в кремниевой подложке $N_B(x)$, но имеющего по сравнению с ними большие размеры площади контактирования металлических электродов истока элементарных ячеек с диффузионными истоковыми p^+ -перемычками ($d = 19$ мкм, $\ell = 330$ мкм). Общее сопротивление единичной истоковой p^+ -перемычки в транзисторной LDMOS-структуре BLF2022-90, полученное посредством суммирования всех входящих в неё 28-ми составных долей, составляет $R_{p \text{ пер}}^*(I) = 0,68175$ Ом. Общее сопротивление единичной диффузионной p^+ -перемычки тестовых структур с $h_{p^+} = 6,65$ мкм и $h_{p^+} = 4,95$ мкм, полученное аналогичным образом, составляет соответственно $R_{p \text{ пер}}(I) = 4,35322$ Ом и $1,83446$ Ом. При этом суммарный вклад составных долей с концентрацией бора $N_B \geq 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в общее распределённое сопротивление истоковой диффузионной p^+ -перемычки в том и другом случае не превышает 3,7%, поэтому при расчёте профиля распределения легирующей примеси $N_B(x)$ в кремниевой подложке им можно пренебречь.

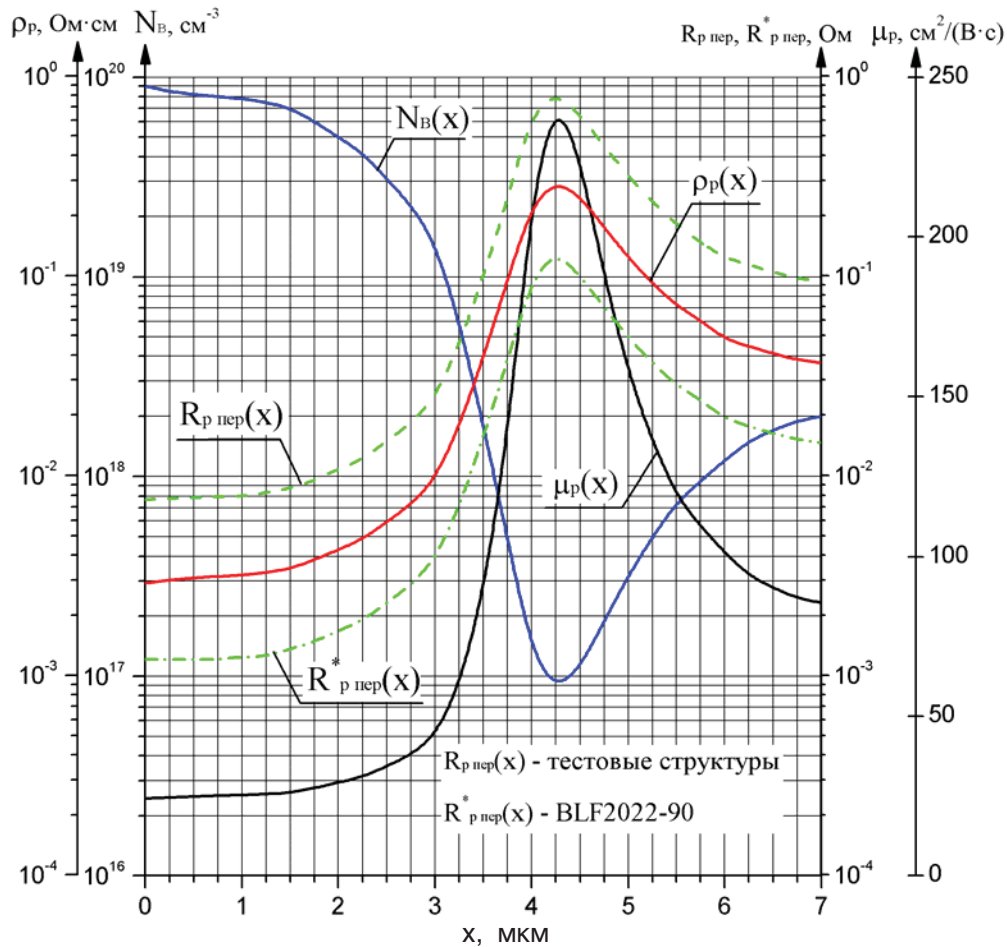


Рис. 3

Профили распределения концентрации легирующей примеси (бора) $N_B = f(x)$, подвижности носителей заряда $\mu_p = f(x)$, удельного $\rho_p = f(x)$ и распределённого сопротивления $R_{p\text{ пер}} = f(x)$, $R_{p\text{ пер}}^* = f(x)$ полупроводникового материала в истоковых p^+ -перемычках элементарных LDMOS-ячеек в направлении x , перпендикулярном лицевой поверхности подложки

Количественная оценка распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных LDMOS-ячеек и его вклад в общее сопротивление сток-исток СВЧ LDMOS транзистора в открытом состоянии

Распределённое сопротивление истокового p^+ -узла элементарных ячеек транзисторной LDMOS-структуры рассчитывается по формуле

$$R_{p\text{ ри}} = R_{p\text{ пер}(n_{\text{яч}})} + R_{p^+\text{ под}} = \frac{R_{p\text{ пер}(l)}}{n_{\text{яч}}} + R_{p^+\text{ под}}, \quad [\text{Ом}], \quad (6)$$

где $R_{p\text{ пер}(l)}$ – распределённое сопротивление единичной диффузионной p^+ -перемычки, $R_{p\text{ пер}(n_{\text{яч}})}$ – распределённое сопротивление совокупности соединённых в параллель диффузионных истоковых p^+ -перемычек, $R_{p^+\text{ под}}$ – распределённое сопротивление высоколегированного истокового p^+ -слоя подложки.

Результаты расчёта зависимостей $N_B(x)$, $\mu_p(x)$, $\rho_p(x)$, $R_{p\text{ пер}}(x)$, $R_{p\text{ пер}}^*(x)$ в описанных выше тестовых p^+ -структурах представлены соответственно на рис. 3. На рис. 4 приведены зависимости $R_{p\text{ пер}}$, $R_{p^+\text{ под}}$, $R_{p\text{ ри}}$ от количества элементарных ячеек и экспериментально измеренные значения распределённого сопротивления $R_{p\text{ ри}}$ тестовых структур с одной автономной и совокупностью 2-х и 13-ти соединённых в параллель элементарных p^+ -ячеек. Распределённое сопротивление высоколегированного p^+ -слоя подложки рассчитывалось по методике [1]. Омическое сопротивление металлических электродов

тестовых структур и контактное сопротивление между Al металлизацией и приконтактной p^+ -областью диффузионных p^+ -перемычек из-за чрезвычайно малой величины при расчёте $R_{p\text{ пер}}$ и $R_{ри}$ не учитывались. Расчётные и измеренные значения сопротивлений тестовых p^+ -структур (рис. 4) хорошо совпадают, что говорит об адекватной разработанной модели структуры и методике количественной оценки распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных ячеек в мощных кремниевых ВЧ и СВЧ LDMOS-транзисторах. По данной методике был проведён расчёт распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных ячеек СВЧ LDMOS транзистора BLF2022-90 фирмы «Philips», выполненный на основе исходных данных, приведённых в [2, 3]. Было получено, что относительный вклад распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных ячеек в общее сопротивление сток-исток данного транзистора в открытом состоянии составляет 8,5%.

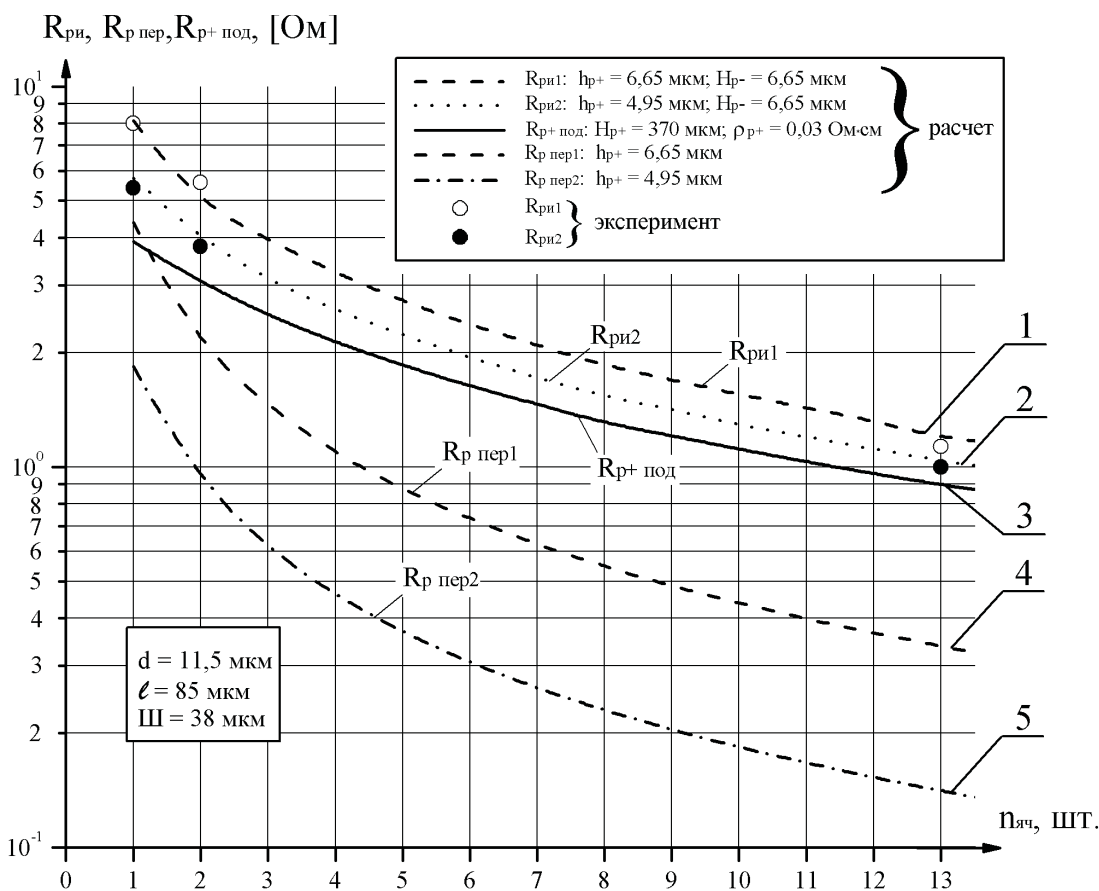


Рис. 4

Графики зависимостей распределённого сопротивления истокового p^+ -узла элементарных ячеек $R_{ри}$ (кривые 1, 2) и его составляющих – высоколегированного истокового p^+ -слоя подложки $R_{p^+ \text{ под}}$ ($R_{p^+ \text{ яч}}$) (кривая 3) и истоковых p^+ -перемычек $R_{p\text{ пер}}$ (кривые 4, 5) от количества ячеек $n_{яч}$ в транзисторной LDMOS-структуре

Выводы

1. Разработана модель структуры мощного кремниевого СВЧ LDMOS транзистора, коррелирующая с результатами экспериментальных исследований, в соответствии с которой объём растекания носителей заряда в истоковых диффузионных p^+ -перемычках элементарных ячеек и прилегающих к ним участках высоколегированного истокового p^+ -слоя подложки представлен соответственно в виде прямоугольного параллелепипеда и обелиска, причём верхние грани параллелепипеда и обелиска равны площади

контактирования металлических электродов истока LDMOS-ячеек с истоковыми диффузионными p^+ -перемычками.

2. Разработана методика количественной оценки распределённого сопротивления истоковых диффузионных p^+ -перемычек, включающая: разбиение общего прямоугольного параллелепипеда на ряд более мелких прямоугольных параллелепипедов, одинаковых по габаритам, последовательно расположенных в направлении x , перпендикулярном лицевой поверхности подложки; поэтапный расчёт концентрации легирующей примеси, подвижности носителей заряда, удельного сопротивления полупроводникового материала, распределённого сопротивления в каждом последовательно расположенном параллелепипеде; суммирование распределённых сопротивлений составных долей истоковой диффузионной p^+ -перемычки для определения её общего сопротивления.

3. Количественно продемонстрировано, что локальное утонение истоковых диффузионных p^+ -перемычек элементарных ячеек, а не использование эпитаксиальных плёнок другого номинала, является эффективным инструментом для уменьшения сопротивления сток-исток LDMOS транзистора в открытом состоянии при сохранении его пробивного напряжения стока на прежнем уровне.

Литература

1. Ерохин С. А., Бачурин В. В., Бычков С. С., Пекарчук Т. Н. Моделирование распределённого сопротивления высоколегированного истокового p^+ -слоя подложки в генераторных LDMOS транзисторах. – Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, 2009, вып. 2, с. 11-17.
2. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника – М.: Высшая школа, 1977, 416 с.
3. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Книга 1. – М.: Мир, 1984, 455 с.
4. Л. Россато. Физическая электроника и микроэлектроника. – М.: Высшая школа, 1991, 352 с.
5. Data sheet BLF2022-90; BLF2022S-90 UHF power LDMOS transistors. Philips Semiconductors, 2003 Sep. 30.
6. Philips BLF2022-90 Power Structural analysis (www.chipworks.com), 2004, june 17.