

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKINGУДК 621.382.323.049.774.2:539.216(045)(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-97-103>Поступила в редакцию 14.11.2019
Received 14.11.2019**Н. Л. Лагунович***Филиал «Научно-технический центр «Белмикросистемы» Открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь***ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОХРАННЫХ КОЛЕЦ И УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ МОЩНОГО *n*-КАНАЛЬНОГО ДМОП-ТРАНЗИСТОРА**

Аннотация. Рассмотрен мощный *n*-канальный ДМОП-транзистор с пробивным напряжением сток-исток $U_{\text{си проб}}$ выше 800 В и пороговым напряжением от 2 до 5 В, по периметру которого при изготовлении часто формируют одно или несколько охранных колец для повышения пробивных напряжений. Описана оптимальная конструкция охранных колец, а также установлено значение удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ρ_v для получения требуемого значения $U_{\text{си проб}}$ транзистора. Построена регрессионная модель, с помощью которой выбраны наиболее оптимальные варианты конструкции охранных колец исследуемого транзистора, и значение ρ_v , в которой изготавливается прибор. Установлено, что применение пятимерного полинома второго порядка в качестве регрессионной модели дает возможность определить оптимальные значения топологических зазоров в области охранных колец и удельного сопротивления ρ_v , позволяющие получать требуемые величины $U_{\text{си проб}}$ транзистора. Экспериментальные значения пробивного напряжения сток-исток транзистора составили 876 и 875 В, а расчетные (при одинаковых параметрах построенной регрессионной модели) – соответственно 874 и 880 В, что составило погрешности 0,23 % и 0,57 %, то есть построенная модель дает хорошее согласование с экспериментальными данными. Установлено, что ρ_v вносит более существенный вклад в значения пробивных напряжений транзистора, чем параметры конструкции охранных колец. Данный *n*-канальный ДМОП-транзистор, применяемый в различных электронных устройствах для энергетики, в мобильных телефонах, в составе высоковольтных интегральных микросхем AC/DC- и DC/DC-конвертеров и высоковольтных, высокостабильных LED-драйверов, был изготовлен в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» по разработанному автором технологическому маршруту.

Ключевые слова: регрессионный анализ, пятимерный полином второго порядка, мощный *n*-канальный ДМОП-транзистор, охранное кольцо, пробивное напряжение сток-исток

Для цитирования: Лагунович, Н. Л. Оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки мощного *n*-канального ДМОП-транзистора / Н. Л. Лагунович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 97–103. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-97-103>

Nataliya L. Lagunovich*Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Openly Joint-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk, Republic of Belarus***OPTIMIZATION OF GUARD RINGS CONSTRUCTION AND EPITAXIAL FILM RESISTIVITY OF POWER *n*-CHANNEL DMOS-TRANSISTOR**

Abstract. Powerful *n*-channel DMOS-transistor with drain-source breakdown voltage $U_{\text{ds br}}$ value over 800 V and threshold voltage from 2 to 5 V was considered in this paper. One or more guard rings are formed on perimeter of such transistor for the breakdown voltage raising. The optimal guard rings construction was described and resistivity value of epitaxial film ρ_v was determined for obtaining required transistor $U_{\text{ds br}}$ value. The regression model was built, with the help of which the

most optimal construction variants of guard rings of investigated transistor and resistivity value of epitaxial film, were selected. It was established that the five-dimensional polynomial of second order using as regression model allowed choosing the optimal topological spaces values in the guard rings area and ρ_s value which made it possible to obtain required $U_{ds,br}$ values of the transistor. Experimental values of transistor drain-source breakdown voltage were 876 and 875 V, but calculated values (at identical parameters of definitional regression model) were 874 and 880 V, accordingly, that were errors of 0.23 % and 0.57 %, i. e. made model fits well with experimental data. It was established that ρ_s makes contribution to breakdown voltages values of the transistor that is more substantial than parameters of guard rings construction. This NDMOS-transistor was manufactured under production conditions of OJSC INTEGRAL – “INTEGRAL” Holding Managing Company according to the technological route developed by the author. Such device is used in various electronic devices for energetics, in mobile phones, as part of high-voltage integrated circuits of AC/DC- and DC/DC-converters and high-voltage, high-stable LED-drivers.

Keywords: regression analysis, five-dimensional polynomial of second order, power n -channel DMOS-transistor, guard ring, drain-source breakdown voltage

For citation: Lagunovich N. L. Optimization of guard rings construction and epitaxial film resistivity of power n -channel DMOS-transistor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 97–103 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-97-103>

Введение. МОП-транзисторы с двойной диффузией, называемые ДМОП-транзисторами, широко используются как в дискретном исполнении, так и в составе интегральных микросхем (ИМС) силовой электроники для повышения рабочих напряжений питания схем. Основные достоинства структуры такого транзистора: высокое пробивное напряжение, большая величина входного импеданса, низкое пороговое напряжение, низкое сопротивление сток-исток в открытом состоянии, высокая скорость переключения, униполярность, совместимость с логикой на основе комплементарных ключей на МОП-транзисторах (КМОП), отсутствие уходов параметров при изменении температуры, отсутствие вторичного пробоя, – определяют перспективы его применения.

В высоковольтных структурах явления пробоя наиболее вероятны по периметру активной области прибора, то есть той области, которая работает непосредственно как транзистор, диод и т. п. С целью повышения пробивного напряжения таких структур по их периметру делают одно или несколько охранных колец [1, 2] с глубиной, превышающей глубину p - n -переходов активной области прибора. Ширина кольца выбирается минимальной (от 5 до 10 мкм), чтобы не увеличивать емкость p - n -перехода. При изготовлении мощных высоковольтных приборов [3, 4], каким является рассматриваемый в данной работе транзистор с пробивным напряжением сток-исток $U_{си,проб}$ свыше 800 В и пороговым напряжением от 2 до 5 В, содержащий несколько охранных колец, часто возникает задача определить их оптимальную конструкцию [5] и значения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки для получения требуемого значения пробивного электрического напряжения p - n -перехода.

Модель объекта исследования. В данной работе высоковольтный n -канальный ДМОП-транзистор рассматривается как сложная система, которая характеризуется значительным числом взаимосвязанных параметров. При исследовании подобных систем ставится задача установить зависимость между входными параметрами (факторами) и выходными параметрами системы, а также определить уровни входных параметров, при которых выходные параметры системы оптимальны. На рис. 1 изображена модель объекта исследования, которую называют кибернетической системой [6]. В ней величины x_1, x_2, \dots, x_k – управляемые факторы, соответствующие воздействиям на систему; величины Y_1, Y_2, \dots, Y_L – параметры (критерии), подлежащие оптимизации. На различные наборы уровней факторов система дает различный отклик. Между уровнями факторов и реакцией (откликом) системы существует взаимосвязь, которую можно описать общим выражением вида [6]

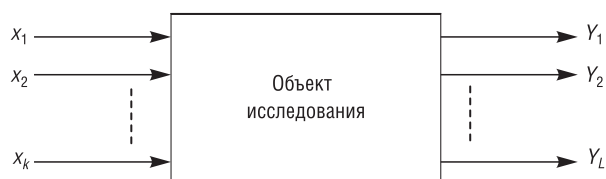


Рис. 1. Схема кибернетической системы
Fig. 1. Scheme of a cybernetic system

$$Y_L = \Psi_L(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (L = 1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

где функция Ψ_L – функция отклика.

Выражение (1) является уравнением регрессии в общем виде. Функции отклика Ψ , которая связывает параметр оптимизации с факторами, соответствует геометрический образ, называемый поверхностью отклика. Исследователю

заранее не известен вид зависимостей Ψ , поэтому ему приходится получать по данным эксперимента приближенные уравнения [6]

$$\hat{Y}_L = \varphi_L(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (L = 1, 2, \dots, m), \tag{2}$$

где \hat{Y}_L – приближенные значения параметров, подлежащих оптимизации; φ_L – приближенные выражения функции отклика.

В таком случае необходимо так поставить эксперимент, чтобы можно было построить математическую модель системы и найти оптимальные значения ее свойств при минимальном количестве опытов, варьируя при этом величины независимых переменных по специально сформулированным правилам.

Оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки мощного *n*-канального ДМОП-транзистора с помощью регрессионной модели. Зависимость (1) иногда в явном виде выражают полиномом (обычно второго порядка), который использован в данной работе как регрессионная модель для нахождения оптимальной конструкции охранных колец и определения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ρ_v исследуемого транзистора. В качестве уровней факторов рассматривались зазоры между охранными кольцами и значения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки, используемой для получения МОП-транзисторов с пробивными напряжениями сток-исток от 400 до 800 В. Значения входных параметров (факторов) задавались технологическими маршрутами изготовления приборов и конструкцией охранных колец. Значения выходных статических и динамических параметров транзисторов были измерены. В качестве выходных параметров транзистора рассматривались величины пробивного напряжения, для описания зависимости которого от зазоров между охранными кольцами и значений ρ_v был использован пятимерный полином второго порядка

$$Y = A_{00} + A_{10} \cdot X_1 + A_{20} \cdot X_2 + A_{30} \cdot X_3 + A_{40} \cdot X_4 + A_{50} \cdot X_5 + A_{11} \cdot X_1^2 + A_{22} \cdot X_2^2 + A_{44} \cdot X_4^2 + A_{55} \cdot X_5^2 + A_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + A_{14} \cdot X_1 \cdot X_4 + A_{15} \cdot X_1 \cdot X_5 + A_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + A_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 + A_{34} \cdot X_3 \cdot X_4 + A_{35} \cdot X_3 \cdot X_5, \tag{3}$$

где Y – значение пробивного напряжения; переменные X_1, X_2, X_3, X_4 – варьируемые в конструкции охранных колец размеры; переменная X_5 – удельное сопротивление эпитаксиального слоя ρ_v ; A_{ij} – коэффициенты полинома.

Величины X_1, X_2, X_3, X_4 , которые задаются на этапе проектирования прибора, показаны на рис. 2. Они представляют собой топологические зазоры и перекрытия в области охранных колец исследуемого транзистора. Фактор X_1 – это зазор между областью p^+ -типа и активной областью прибора; значение X_2 показывает, насколько слой поликремния перекрывает активную область; X_3 – это зазор между областью p^+ -типа и первым охранным кольцом транзистора; фактор X_4 – это зазор между охранными кольцами. В процессе выполнения эксперимента их значения варьировались в допустимых диапазонах без значительного увеличения площади кристалла транзистора, но при этом позволяющих получать требуемые величины $U_{си\ проб}$ прибора. Величина X_5 определяется условиями формирования эпитаксиальной пленки и, как известно из большого количества эмпирических

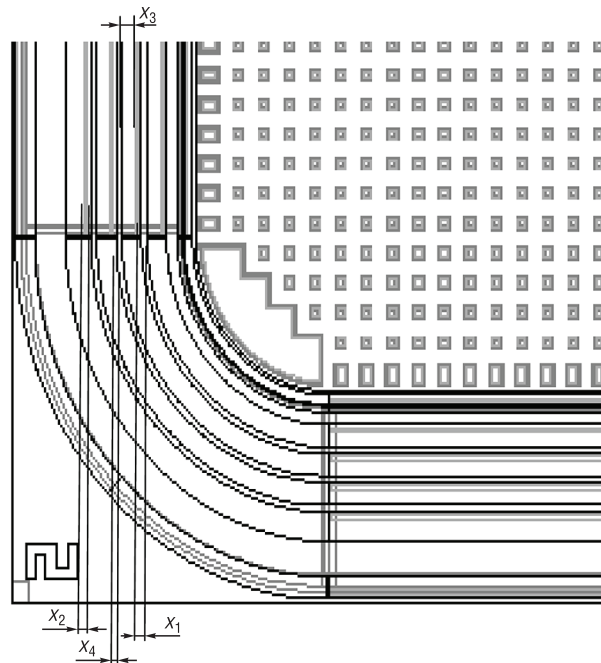


Рис. 2. Фрагмент топологии мощного *n*-канального ДМОП-транзистора с пробивным напряжением сток-исток свыше 800 В

Fig. 2. Topology fragment of the powerful *n*-channel DMOS-transistor with the drain-source breakdown voltage over 800 V

исследований, оказывает очень существенное влияние на пробивные характеристики приборов. Следовательно, оптимизация ее значения с целью получения требуемых величин $U_{\text{си проб}}$ транзистора также занимает важное место в процессе исследований, проведенных в рамках данной работы. Переменной Y присваивались измеренные значения пробивных напряжений сток-исток, которые, как уже было отмечено, варьировались в пределах от 400 до 800 В.

Таким образом, с помощью определенных конструктивных значений в области охранных колец X_1, X_2, X_3, X_4 , а также величин ρ_v эпитаксиальной пленки, в которой формировался прибор, X_5 был получен ряд конкретных значений $U_{\text{си проб}}$ n -канального ДМОП-транзистора. Варьировавшиеся в процессе экспериментальных исследований факторы X_1, X_2, X_3, X_4 и X_5 и полученные в результате величины пробивного напряжения Y были сведены в единую таблицу в программе Excel, где был выполнен регрессионный анализ, в процессе которого рассчитаны значения коэффициентов A_{ij} уравнения (3). Поскольку программа Excel имеет ограничения по объему расчетов при выполнении регрессионного анализа, значения коэффициентов $A_{33}, A_{13}, A_{25}, A_{45}$ были приняты равными нулю.

Регрессионная модель (выражение (3)) дает возможность получать требуемые величины $U_{\text{си проб}}$, варьируя размеры в конструкции охранных колец и значения ρ_v , позволяя подобрать их оптимальные конструкции и значения для того, чтобы установить необходимую величину пробивного напряжения. Модель хорошо согласуется с экспериментальными данными и дает напряжения пробоя, близкие к реальным, что видно из табл. 1, где представлены как экспериментальные, так и расчетные значения $U_{\text{си проб}}$ исследуемого прибора. Как следует из табл. 1, измеренные значения $U_{\text{си проб}}$ транзистора составили 876 и 875 В. Полученные при таких же величинах X_1, X_2, X_3, X_4 и X_5 расчетные значения $U_{\text{си проб}}$ равны 874 и 880 В, то есть погрешности вычислений составили 0,23 и 0,57 %. Таким образом, погрешность моделирования находится в диапазоне ± 1 %, что подтверждает правильность выбранного эмпирико-статистического метода исследований и построенной на его основе регрессионной модели.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения пробивного напряжения сток-исток $U_{\text{си проб}}$ исследуемого транзистора

Table 1. Experimental and calculated drain-source breakdown voltage $U_{\text{ds br}}$ values of the investigated transistor

Экспериментальные значения $U_{\text{си проб}}$, В	Результаты расчетов $U_{\text{си проб}}$, В	Погрешность расчетов, %
876	874	0,23
875	880	0,57

Таблица 2. Варианты конструкции охранных колец мощного n -канального ДМОП-транзистора

Table 2. The design options of the powerful n -channel DMOS transistor guard rings

№ варианта конструкции охранных колец	Зазор p^+ -область – активная область, X_1 , мкм	Перекрытие поликремний – активная область, X_2 , мкм	Зазор p^+ -область – первое охрannое кольцо, X_3 , мкм	Зазор между охранными кольцами, X_4 , мкм
1	19	17	54	28
2	19	17	60	33
3	19	23	60	28
4	19	23	54	33
5	25	17	60	28
6	25	17	54	33
7	25	23	54	28
8	25	23	60	33
9	22	20	57	31

Степень влияния конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки на значения пробивных напряжений. С целью определения степени влияния конструкции охранных колец и значения ρ_v эпитаксиальной пленки на величины пробивных напряжений автором был осуществлен дисперсионный анализ, методика которого описана в [7]. Алгоритм данной методики заложен в основу программы для статистического анализа Stadia, при помощи которой выполнен дисперсионный анализ. В программе Stadia в строках таблицы исходных данных задавались значения напряжения пробоя, соответствующие конкретным величинам удельного сопротивления эпитаксии ρ_v (четыре значения ρ_v – четыре строки). В столбцах таблицы исходных данных напряжения пробоя соответствовали определенной конструкции охранных колец (девять вариантов конструкции – девять столбцов).

Для выяснения влияния конструкции охранных колец на значения пробивного напряжения проводился однофакторный дисперсионный анализ. Было взято девять уровней фактора (девять вариантов конструкции, которые даны в табл. 2). Исходные данные задавались в виде таблицы с девятью столбцами, в каждом из которых приводились значения

пробивных напряжений, соответствующие одному из девяти уровней фактора (вариантов конструкции охранных колец). В результате расчетов определено, что фактор оказывает влияние на пробивное напряжение с вероятностью $P = 0,98$.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что на величины $U_{\text{си проб}}$ оказывают влияние как конструкция охранных колец, так и значения ρ_v . Установлено, что удельное сопротивление эпитаксиальной пленки вносит более существенный вклад в значения пробивных напряжений транзистора, а вероятность того, что величина ρ_v влияет на значения пробивных напряжений, равна $P = 1$.

Экспериментальная оценка влияния конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки на значения пробивных напряжений. По разработанному автором технологическому маршруту в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» были изготовлены экспериментальные образцы мощного ДМОП-транзистора на пластинах типа КЭС-0,01 (кремний электронного типа проводимости, легированный сурьмой, с удельным сопротивлением $\rho_v = 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) с эпитаксией типа 70 КЭФ-40 (кремниевая эпитаксиальная пленка электронного типа проводимости, легированная фосфором, толщиной 70 мкм с удельным сопротивлением $\rho_v = 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Технологический маршрут формирования структуры исследуемого ДМОП-транзистора включал следующие основные этапы:

- 1) наращивание толстой высокоомной эпитаксиальной пленки n -типа на сильнолегированной пластине n^+ -типа;
- 2) формирование p^+ -областей охранных колец по периметру прибора путем ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 3) формирование поликремниевого затвора;
- 4) формирование областей p -типа (базы) ДМОП-транзистора путем ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 5) формирование областей истоков n^+ -типа методом ионного легирования фосфором и его последующей разгонки;
- 6) нанесение межслойного окисла и создание в нем контактных окон;
- 7) напыление металла для формирования контактов к высоколегированным областям.

При изготовлении экспериментальных образцов в соответствии с данным маршрутом был реализован план эксперимента по конструкции охранных колец, представленный в табл. 2. На полученных образцах транзистора были измерены его статические и динамические параметры. Значения пробивных напряжений сток-исток транзистора для девяти различных вариантов конструкции охранных колец, а также для случаев, когда измерения выполнялись как на кристаллах без корпуса, так и на приборах, собранных в корпус, представлены в табл. 3. Из данной таблицы видно, что максимальная величина пробивного напряжения сток-исток транзистора без корпуса была получена для варианта конструкции охранных колец № 8. Однако наибольшие пробивные напряжения на приборах, собранных в корпус, получены для вариантов № 7–9. Кроме того, на приборах с конструкцией охранных колец № 9 пороговое напряжение транзистора было наиболее близким к середине интервала требуемых значений, а значение времени задержки включения транзистора ниже, чем на приборах с конструкциями № 7 и 8. Таким образом, установлено, что для серийного производства исследуемого мощного транзистора оптимальной является конструкция № 9.

По приведенному технологическому маршруту экспериментальные образцы изготавливались неоднократно [4], и измерения статических и динамических характеристик прибора также выполнялись большое количество

Таблица 3. Значения пробивных напряжений сток-исток $U_{\text{си проб}}$ мощного n -канального ДМОП-транзистора, измеренные как на кристаллах без корпуса, так и на приборах, собранных в корпус

Table 3. Drain-source breakdown voltage $U_{\text{ds br}}$ values of the power n -channel DMOS-transistor, measured both on crystals without the case, and on devices assembled in the case

№ варианта конструкции охранных колец	Средние значения $U_{\text{си проб}}$ транзистора, В	
	измеренные на кристаллах без корпуса	измеренные на приборах, собранных в корпус
1	879	866
2	831	829
3	875	865
4	867	864
5	875	870
6	879	870
7	878	875
8	880	875
9	879	875

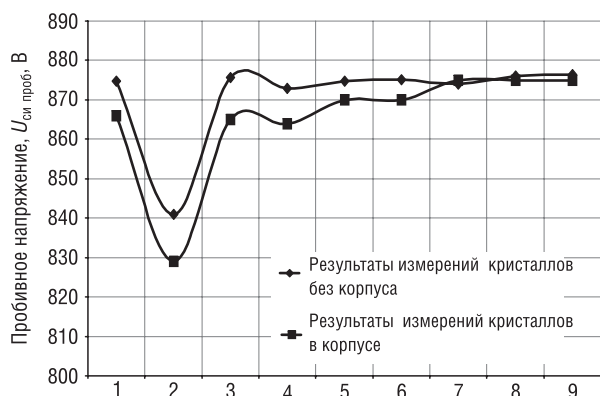


Рис. 3. Значения пробивного напряжения мощного n -канального ДМОП-транзистора, измеренные на его кристаллах без корпуса и собранных в корпус, в зависимости от варианта конструкции охранных колец

Fig. 3. Drain-source breakdown voltage values of the power n -channel DMOS-transistor, measured both on its crystals without the case, and on devices assembled in the case, depending on the guard rings design

Таким образом, в процессе исследований было установлено, что наиболее оптимальной является конструкция охранных колец №9, которая позволяет получать не только высокие значения пробивных напряжений сток-исток исследуемого транзистора, но и оптимальные значения других статических и динамических параметров прибора (пороговое напряжение, время задержки включения транзистора и т. д.).

Заключение. С помощью регрессионного анализа были выполнены оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки мощного n -канального ДМОП-транзистора, что позволило получить требуемые (свыше 800 В) величины пробивного напряжения сток-исток прибора, максимальные экспериментальные значения которого составили от 875 до 880 В. Полученные с помощью регрессионной модели расчетные величины $U_{\text{си проб}}$ отличаются от соответствующих экспериментальных данных на 2–5 В, то есть погрешность вычислений составила 0,23–0,57 %.

С помощью дисперсионного анализа установлено, что на величину $U_{\text{си проб}}$ оказывают влияние как конструкция охранных колец, так и значение r_v , причем последнее вносит более существенный вклад в значения пробивных напряжений прибора. Была оценена разница между величиной пробивного напряжения $U_{\text{си проб}}$ экспериментального образца транзистора без корпуса и значением $U_{\text{си проб}}$ прибора, собранного в корпус, которая составила от 0 до 11 В в зависимости от варианта конструкции транзистора.

Исследованный транзистор был изготовлен в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» по разработанному автором технологическому маршруту и широко применяется в различных электронных устройствах для энергетики, в мобильных телефонах, в составе высоковольтных интегральных микросхем AC/DC- и DC/DC-конвертеров и высоковольтных, высокостабильных LED-драйверов.

Список использованных источников

- Шахмаева, А. Р. Конструктивно-технологические методы улучшения параметров полупроводниковых приборов / А. Р. Шахмаева, П. Р. Захарова // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 1, вып. 1. – С. 36–40.
- Лагунович, Н. Л. Усовершенствованный технологический маршрут формирования биполярного транзистора со статической индукцией / Н. Л. Лагунович // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 72–78. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-72-78>
- Лоренц, Л. Состояние и направления дальнейшего развития в сфере разработки производства и применения силовых полупроводниковых приборов / Л. Лоренц // Электротехника. – 2001. – № 12. – С. 2–12.
- Моделирование кремниевого мощного вертикального n -канального ДМОП-транзистора / Н. Л. Дудар [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 5. – С. 93–97.

раз с целью набора нужного объема статистических данных. Результаты измерений, приведенные в табл. 3, соответствуют данным, представленным на рис. 3, на котором видно, насколько сборка кристалла в корпус влияет на величину пробивного напряжения сток-исток прибора для различных конструкций его охранных колец. С помощью табл. 3 и рис. 3 можно оценить разницу между величиной пробивного напряжения $U_{\text{си проб}}$ кристалла без корпуса и значением $U_{\text{си проб}}$ прибора, собранного в корпус. Данная разница составила от 11 В для транзистора с конструкцией №2 и до 0 В для конструкции №8. Минимальные различия между величиной $U_{\text{си проб}}$ кристалла без корпуса и значением $U_{\text{си проб}}$ прибора, собранного в корпус, получены для конструкций №7–9, что еще раз подтверждает оптимальность указанных вариантов для случая получения требуемой величины $U_{\text{си проб}}$.

5. Avset, B.S. The effect of metal field plates on multiguard structures with floating p⁺ guard rings / B.S. Avset, L. Evensen // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 1996. – Vol. 377, iss. 2–3. – P. 397–403. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00194-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00194-5)
6. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
7. Шеффе, Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

References

1. Shakhmaeva A. R., Zaharova P. R. Construction and Technological Methods for Improvement of Semi-Conductor Parameters. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Saratov State Technical University*, 2012, no. 1 (63), iss. 1, pp. 36–40 (in Russian).
2. Lagunovich N. L. Improved Process Flow for Formation of Bipolar Static Induction Transistor. *Nauka i tehnika = Science & Technique*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 72–78 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-72-78>
3. Lorents L. Trends in power integration, state-of-the art and future. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*, 2001, no. 12, pp. 2–12 (in Russian).
4. Dudar N. L., Leonov N. I., Getman S. N., Nelaev V. V., Krasikov M. G. The Simulation of the Silicon Power Vertical N-channel DMOS-transistor. *Doklady Nacional'nai akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2006, vol. 50, no. 5, pp. 93–97 (in Russian).
5. Avset B. S., Evensen L. The effect of metal field plates on multiguard structures with floating p⁺ guard rings. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research. Section A*, 1996, vol. 377, iss. 2–3, pp. 397–403. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00194-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00194-5)
6. Zedginidze I. G. *Experiment Planning for Investigation of Multicomponent Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 390 p. (in Russian).
7. Sheffe G. *The Analysis of Variance*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 512 p. (in Russian).

Информация об авторе

Лагунович Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, ведущий инженер, Филиал «Научно-технический центр «Белмикросистемы» Открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Корженевского, 12, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n_dudarby@tut.by

Information about the author

Nataliya L. Lagunovich – Ph. D. (Engineering), Advanced Engineer, Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Open Joint-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (12, Korzhenevskii Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n_dudarby@tut.by