

## Моделирование Super Junction LDMOS транзисторных структур

*Ткачёв А. Ю., Петров Б. К., Асessorов В. В., Кожевников В. А., Дикарев В. И.,  
Цоцорин А. Н.*

*Получены аналитические выражения для расчёта пробивного напряжения сток-исток Super Junction LDMOS транзисторных структур на КНС. Выведен критерий выбора конструктивных параметров дрейфовой области стока. Представлены результаты численного моделирования электрических характеристик SJ-LDMOS транзисторных структур. Результаты расчёта с использованием полученных аналитических выражений дают хорошее качественное и количественное совпадение с результатами численного моделирования на базе ISE TCAD.*

### **Введение**

В настоящее время одним из перспективных конструктивных решений полевых транзисторов являются LDMOS транзисторы с суперпереходом (Super Junction LDMOS, SJ-LDMOS). Анализ зарубежных публикаций показывает, что главное достоинство SJ-LDMOS транзисторов – это существенное снижение сопротивления сток-исток в открытом состоянии при сохранении высокого пробивного напряжения сток-исток в закрытом состоянии транзистора [1,2]. Это достоинство может быть эффективно использовано для создания приборов силовой электроники. Принцип работы SJ-LDMOS транзисторов подобен принципу работы серийно выпускаемых COOL-MOS транзисторов [3,4], однако SJ-LDMOS транзисторы обладают существенным преимуществом перед COOL-MOS транзисторами. Транзисторные кристаллы, выполненные по LDMOS технологии, могут монтироваться непосредственно на фланец без использования бериллиевой керамики. Контакт истока осуществляется к нижней поверхности транзисторного кристалла. Данное конструктивное решение позволяет уменьшить до минимума входную индуктивность и тепловое сопротивление транзистора.

SJ-LDMOS транзисторы могут быть изготовлены как по технологии кремний-на-сапфире (КНС), так и на основе монокристаллического кремния с изоляцией р-п-переходом. С точки зрения улучшения отвода тепла предпочтительным является исполнение в монокристаллическом кремнии, но проектирование таких транзисторов заметно сложнее из-за большего количества конструктивных параметров.

Вместе с тем следует отметить, что сообщения о промышленном выпуске SJ-LDMOS транзисторов до настоящего времени отсутствуют. В зарубежных публикациях упоминается лишь о создании лабораторных образцов КНС SJ-LDMOS транзисторов. Сдерживание развития разработок SJ-LDMOS транзисторов объясняется как отсутствием целостной теории физики работы транзисторов данного класса, так и технологическими трудностями практической реализации SJ-LDMOS транзисторов.

В отечественной научно-технической литературе не встречается сведений об исследованиях SJ-LDMOS транзисторов, по крайней мере, авторам такие публикации не известны. Поэтому в данной работе предпринята попытка построения в первом приближении относительно простой физической модели данных транзисторов, а именно рассмотрены SJ-LDMOS транзисторные структуры, сформированные по технологии КНС, как наиболее простые для теоретического анализа. По мнению авторов, основные выводы исследования применимы и для первоначальных оценок параметров SJ-LDMOS

структур на монокристаллическом кремнии. Вопросы технологической реализации SJ-LDMOS транзисторов в данной работе не рассматриваются.

Схема рассматриваемой конструкции КНС SJ-LDMOS транзисторов приведена на рис. 1. Особенность конструкции заключается в том, что дрейфовая область стока представляет собой систему чередующихся диффузионных слоёв в виде полосковой структуры с n- и p-типами проводимости. За счёт подбора их ширины и концентрации примесей в них достигается обеднение дрейфовой области стока при обратном смещении на стоке.

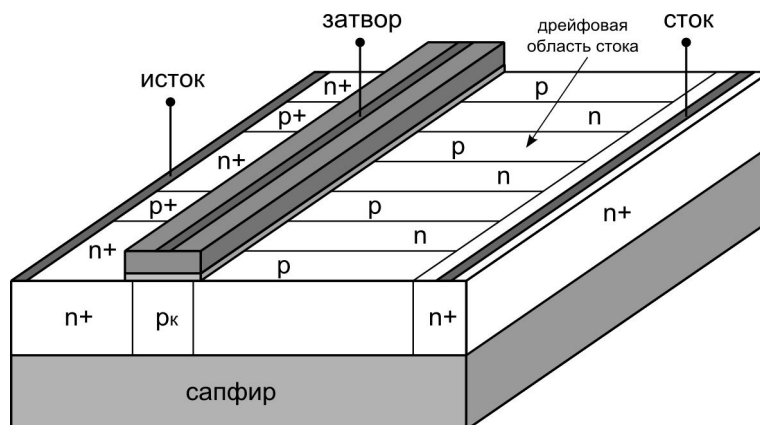


Рис. 1

Схема конструкции КНС SJ-LDMOS транзисторной структуры

### *Аналитическое исследование КНС SJ-LDMOS транзисторных структур*

Рассмотрим КНС SJ-LDMOS транзисторную структуру, сформированную в относительно тонкой плёнке кремния. В этом случае можно принять, что распределение примесей по глубине кремния равномерное. Кроме того, если ограничиться рассмотрением лишь пробивного напряжения стока, то в первом приближении можно не учитывать влияние затвора и истоковой n<sup>+</sup>-области и, таким образом, исключить их из модели исследуемой структуры. Тогда трёхмерную транзисторную структуру можно представить в виде двумерной диодной, фрагмент которой показан на рис. 2.

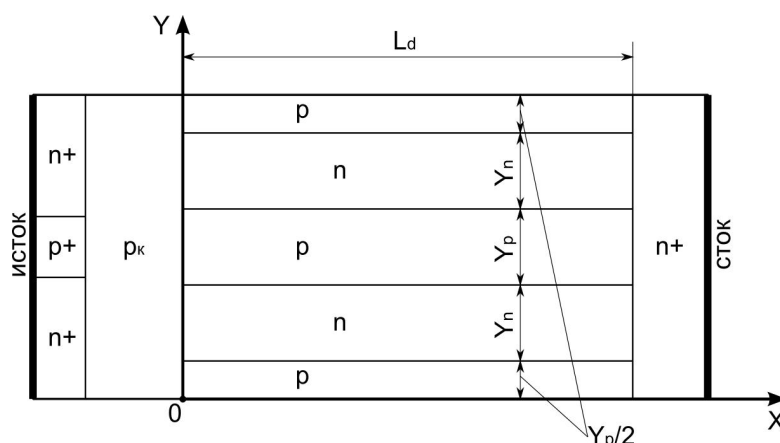


Рис. 2

Двумерная диодная структура с суперпереходом

Вычислим пробивное напряжение сток-исток. Примем следующие допущения. Будем считать, что примеси в n- и p-полосах распределены равномерно и их концентрации равны  $N_{dn}$  и  $N_{ap}$  соответственно, тогда p-n-переходы между полосами ступенчатые. Примем  $N_{dn} = N_{ap} = N$ . Также примем, что ширина полос (кроме крайних) одинаковая  $Y_n = Y_p = Y$ , ширина крайних полос составляет  $0,5Y$ .

Рассмотрим структуру при нулевом напряжении сток-исток  $U_{cu} = 0$ . В этом случае вдоль p-n-перехода будут существовать тонкие обеднённые слои из ионов донорной и акцепторной примесей, возникающие из-за контактной разности потенциалов:

$$\text{на границах p-полос и n}^+\text{-области: } \varphi_{kp-n^+} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{ap} \cdot N_{dn^+}}{n_i^2};$$

$$\text{на границах n-полос и p}_k\text{-области: } \varphi_{kp-k-n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{apk} \cdot N_{dn}}{n_i^2};$$

$$\text{на границах между n- и p-полосами: } \varphi_{kp-n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{ap} \cdot N_{dn}}{n_i^2} = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N}{n_i}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура структуры;  $q$  – заряд электрона;  $N_{dn^+}$  – концентрация примеси в n<sup>+</sup>-области;  $N_{apk}$  – концентрация примеси в канальной p<sub>k</sub>-области;  $n_i$  – собственная концентрация носителей в кремнии.

Обеднением на границе p-полос и n<sup>+</sup>-области стока, а также n-полос и p<sub>k</sub>-области в первом приближении пренебрежём.

Найдём ширину обеднённой области p-n-перехода  $L_{pn}$  между n- и p-полосами в отсутствие напряжения сток-исток:

$$L_{pn}(U_{cu} = 0) = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{kp-n}(N_{ap} + N_{dn})}{qN_{ap}N_{dn}}} = 2\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0\varphi_{kp-n}}{qN}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$  – диэлектрические проницаемости кремния и вакуума соответственно.

Рассмотрим случай, когда при нулевом затворном напряжении  $U_{zu} = 0$  и отсутствии n-канала на поверхности p<sub>k</sub>-диффузионной области подано небольшое стоковое напряжение  $U_{cu} > 0$  (положительный потенциал на n<sup>+</sup>-области стока относительно истокового электрода). Тогда вдоль p-полос потенциал постоянен и равен нулю:  $\psi_p(x) = 0$  при  $0 \leq x \leq L_d - L_{pn^+}(U_{cu})$ , где  $L_d$  – длина n- и p-полос дрейфовой области стока;  $L_{pn^+}(U_{cu})$  – ширина обеднённого слоя в p-n<sup>+</sup>-переходах на границах p-полос с n<sup>+</sup>-стоковой областью. Структуры n<sup>+</sup>-p<sub>k</sub>-n представляют собой запертые при  $U_{zu} = 0$  МОП транзисторы, на которых падает напряжение  $U_{cu}$ . Следовательно, образуются полностью обеднённые слои в n-полосах шириной

$$L_n(U_{cu}) \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{kp-k-n} + U_{cu})}{q} \cdot \left( \frac{1}{N_{apk}} + \frac{1}{N_{dn}} \right)}.$$

Вдоль n-полос при  $L_n(U_{cu}) \leq x \leq L_d$  потенциал  $\psi_n(x)$  постоянен и равен  $(\varphi_{kp-k-n} + U_{cu})$ .

Ширина обеднённых областей p-n-переходов на границе между n- и p-полосами при  $L_n(U_{cu}) \leq x \leq (L_d - L_{pn^+}(U_{cu}))$  будет равна

$$L_{pn}(U_{cu} > 0) = 2\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{kp-n} + U_{cu})}{qN}}. \quad (3)$$

Так как концентрации примесей в n- и p-полосах равны, ширина обеднённых областей в полосах также одинакова и равна  $0,5L_{pn}$ . При определённом напряжении  $U_{cu}^*$  ширина каждой обеднённой области в полосах становится равной полуширине полос, то есть полосы полностью обедняются:

$$Y = 2\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0(\varphi_{kp-n} + U_{cu}^*)}{qN}}.$$

После преобразования получаем напряжение полного обеднения дрейфовой области стока:

$$U_{cu}^* = \frac{qNY^2}{4\varepsilon\varepsilon_0} - \varphi_{kp-n}. \quad (4)$$

Рассмотрим распределение напряжённости электрического поля  $E_y$  вдоль оси OY (см. рис. 2). Пусть  $U_{cu} = U_{cu}^*$ . Значение напряжённости поля находим из решения уравнения Пуассона, пренебрегая свободными носителями:

$$\frac{dE_y(y)}{dy} = \frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (\text{n-полоса}); \quad (5)$$

$$\frac{dE_y(y)}{dy} = -\frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (\text{p-полоса}). \quad (6)$$

Граничные условия:  $E_y(0) = E_y(Y) = E_y(2Y) = E_y(3Y) = E_y(4Y) = 0$ . Решая (5) и (6) с указанными граничными условиями, получаем для случая расположения полос, показанного на рис. 2:

$$E_y(y) = -\frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0} y \quad \text{при } y \in [0; \frac{Y}{2}];$$

$$E_y(y) = -\frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0} (Y - y) \quad \text{при } y \in [\frac{Y}{2}; \frac{3Y}{2}]; \quad (7)$$

$$E_y(y) = \frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0} (2Y - y) \quad \text{при } y \in [\frac{3Y}{2}; \frac{5Y}{2}] \text{ и т. д.}$$

При этом максимальное значение напряжённости поля  $E_{y_{max}}$  равно  $\frac{qNY}{2\varepsilon\varepsilon_0}$ .

Следует заметить, что при  $U_{cu} < U_{cu}^*$  в n- и p-полосах существует только поперечная составляющая электрического поля  $E_y$ , а продольная составляющая  $E_x = 0$ . Действительно, при  $U_{cu} < U_{cu}^*$  вдоль центральных квазинейтральных узких полосок, параллельных оси OX, в n-полосах потенциал  $\psi_n$  постоянен и равен  $(\varphi_{kp-n} + U_{cu})$ , а в p-полосах потенциал  $\psi_p$  также постоянен и равен нулю.

При  $U_{cu} > U_{cu}^*$  ширина обеднённых слоёв в n- и p-полосах уже перестаёт расти, так как она достигла предельных значений, и дрейфовая область стока уже обеднена полностью. Поперечное падение напряжения (вдоль оси OY) в соседних n- и p-полосах остаётся неизменным и равным  $U_{cu}^*$ . Вдоль обеднённых n- и p-полос (вдоль оси OX)

возникает продольное падение напряжения  $U_{cu} - U_{cu}^*$ . Соответственно появляется продольная составляющая поля:

$$E_x = \frac{U_{cu} - U_{cu}^*}{L_D}. \quad (8)$$

Продольная составляющая поля оказывается постоянной и не зависящей от координаты  $x$ . Действительно, в  $n$ -полосе при  $U_{cu} > U_{cu}^*$  справедливо двумерное уравнение Пуассона вместо одномерного (5):

$$\frac{\partial E_x(x)}{\partial x} + \frac{\partial E_y(y)}{\partial y} = -\frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (9)$$

В уравнении (9)  $\frac{\partial E_y(y)}{\partial y} = -\frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0}$  как при  $U_{cu} > U_{cu}^*$ , так и при  $U_{cu} \leq U_{cu}^*$ . Тогда из (9)

следует, что  $\frac{\partial E_x(x)}{\partial x} = 0$  и, следовательно,  $E_x = const$ . Однако необходимо иметь в виду, что данное заключение несправедливо для краёв полос.

Увеличивая напряжение  $U_{cu}$ , можно увеличить продольную составляющую поля  $E_x$  в  $n$ -полосе до напряжённости поля лавинного пробоя  $E_{x\_проб} = (2,5-3,0) \cdot 10^5$  В/см для кремния. Следовательно, лавинный пробой произойдет при напряжении сток-исток, равном

$$U_{cu\_проб} = U_{cu}^* + E_{x\_проб} \cdot L_D = U_{cu}^* + (2,5 \div 3,0) \cdot 10^5 \cdot L_D. \quad (10)$$

Аналогичный вывод о продольной составляющей поля и лавинном пробое можно сделать и для  $p$ -полосы. Здесь предполагается, что поперечная составляющая электрического поля мала и ей можно пренебречь, что справедливо в случае, если концентрация примесей и ширина полос таковы, что полосы полностью обедняются задолго до наступления поперечного пробоя. Случай, когда поперечная составляющая напряжённости электрического поля играет определяющую роль, будет рассмотрен далее.

Более точное значение напряжённости поля продольного пробоя  $E_{x\_проб}$  в однородном обеднённом слое длины  $L_D$  можно найти из условия пробоя:

$$\int_0^{L_D} \alpha(E_{x\_проб}) dx = 1 \quad (11)$$

или с учётом постоянства продольной составляющей электрического поля:

$$\alpha(E_{x\_проб}) \cdot L_D = 1, \quad (12)$$

где согласно [5]

$$\alpha(E) = 7,94 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{1,49 \cdot 10^6}{E}\right). \quad (13)$$

Из равенств (12) и (13) находим  $E_{x\_проб}$  и после подстановки в выражение (10) получаем:

$$U_{cu\_проб} = U_{cu}^* + \frac{1,49 \cdot 10^6 \cdot L_D}{\ln(7,94 \cdot 10^5 \cdot L_D)}. \quad (14)$$

С учётом выражений (14), (4) и (1) находим окончательное выражение для пробивного напряжения сток-исток:

$$U_{cu\_проб} = \frac{qNY^2}{4\varepsilon\varepsilon_0} - 2 \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N}{n_i}\right) + \frac{1,49 \cdot 10^6 \cdot L_D}{13,59 + \ln(L_D)}. \quad (15)$$

Выражение (15) не является универсальным, так как не учитывает возможности пробоя р-п-перехода между полосами под действием поперечной составляющей поля  $E_y$ . Такая ситуация возможна при достаточно большой ширине полос и большой концентрации примесей в них, когда поперечный пробой наступает до полного обеднения полос, то есть пробивное напряжение р-п-перехода оказывается меньше  $U_{cu}^*$ . Найдем пробивное напряжение  $U_{y\_проб}$  р-п-перехода между п- и р-полосами. Аналогично выражению (11) критерий пробоя имеет вид:

$$\int_{\frac{L_{pn}}{2}}^{\frac{L_{pn}}{2}} \alpha(E_{y\_проб}) dy = 1. \quad (16)$$

С учётом выражений (7), (13), а также в связи с тем, что положение границ обеднённой области р-п-перехода и напряжённость поля в переходе зависят от  $U_y$ , можно записать критерий (16) следующим образом:

$$15,88 \cdot 10^5 \cdot \int_0^{\frac{L_{pn}(U_y)}{2}} \exp\left(-\frac{1,49 \cdot 10^6}{\frac{qN}{\varepsilon\varepsilon_0} \left(\frac{L_{pn}(U_y)}{2} - y\right)}\right) dy = 1. \quad (17)$$

где согласно равенству (3)

$$L_{pn}(U_y) = 2 \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 (\varphi_{kp-n} + U_{cu})}{qN}}. \quad (18)$$

Решая трансцендентное уравнение (17) с учётом (18), можно определить напряжение поперечного пробоя  $U_{y\_проб}$ .

Зная пробивное напряжение  $U_{y\_проб}$ , можно для заданной концентрации примесей определить максимально допустимую ширину полос дрейфовой области, при которой поперечный пробой ещё не наступает. Сформулируем критерий выбора ширины п- и р-полос: ширина полос должна быть меньше, чем ширина обеднённой области р-п-перехода при напряжении поперечного пробоя:

$$Y < Y_{\max} = 2 \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 (\varphi_{kp-n} + U_{y\_проб})}{qN}}. \quad (19)$$

Таким образом, при заданной концентрации примесей в полосах при расчёте

пробивного напряжения сток-исток в закрытом состоянии выбор выражения (15) или (17) определяется шириной полос дрейфовой области стока. Если ширина полос меньше, чем критическая ширина  $Y_{max}$ , определяемая по выражению (19), то пробивное напряжение сток-исток нужно рассчитывать с помощью выражения (15). При этом поперечная составляющая электрического поля в полосах дрейфовой области будет существенно меньше продольной и ей можно пренебречь. Если ширина полос больше или равна критической ширине  $Y_{max}$ , то пробивное напряжение сток-исток нужно рассчитывать с помощью выражений (17) и (18). При этом в рамках принятых допущений в полосах дрейфовой области присутствует лишь поперечная составляющая электрического поля, продольная составляющая равна нулю.

В таблице 1 приведены расчётные значения поперечного пробивного напряжения при различных концентрациях примесей в полосах, рассчитанные с помощью выражений (17) и (18) методом последовательных приближений в программе Mathcad. Там же представлены рассчитанные с помощью критерия (19) максимально допустимые значения ширины полос для указанных значений концентрации примесей.

Таблица 1

Расчётные значения поперечного пробивного напряжения и максимальной ширины полос в зависимости от концентрации примесей в полосах

$N, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30
$U_{y\_проб}, \text{ В}$	84,5	53,7	41,6	34,9	30,5	27,4	25,0	23,2	21,7	20,4	14,1	11,5
$Y_{max}, \text{ мкм}$	4,76	2,69	1,94	1,54	1,29	1,12	0,99	0,89	0,82	0,75	0,45	0,33

В таблице 2 приведены расчётные значения пробивного напряжения сток-исток при различных концентрациях примесей в полосах, ширине полос и длине дрейфовой области стока, полученные с помощью выражения (15). Серым тоном выделены ячейки, для которых ширина полос больше, чем максимально допустимая. Пробивное напряжение для структуры с соответствующими конструктивными параметрами должно рассчитываться с помощью выражений (17) и (18), так как выражение (15) неприменимо для данного случая.

Таблица 2

Расчётные значения пробивного напряжения сток-исток диодной структуры с суперпереходом

$L_D, \text{ мкм}$	10						20	30	40
$N, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	1	3	5	7	10	30	5		
$U_{си\_проб}, \text{ В}$ при $Y = 0,9Y_{max}$	291	257	248	243	240	232	429	599	764
$U_{си\_проб}, \text{ В}$ при $Y = 0,5Y_{max}$	244	233	230	229	228	225	411	582	746
$U_{си\_проб}, \text{ В}$ при $Y = 1 \text{ мкм}$	226	234	241	249	260	335	422	593	757

Таким образом, получены выражения, позволяющие определить пробивное напряжение сток-исток в закрытом состоянии SJ-LDMOS транзисторных структур. Также получен критерий выбора одного из основных конструктивных параметров – ширины полос дрейфовой области стока – в зависимости от концентрации примесей в полосах.

### Численное моделирование КНС SJ-LDMOS транзисторных структур

Для проверки полученных результатов проведено численное моделирование электропараметров КНС SJ-LDMOS структуры в среде САПР ISE TCAD [6,7]. В качестве примера численного моделирования взяты следующие основные конструктивные параметры трёхмерной модели SJ-LDMOS транзисторной структуры: толщина плёнки кремния 1 мкм, длина затвора 2 мкм, толщина подзатворного окисла 400 Å, пороговое напряжение  $U_{nop} = 3$  В, длина дрейфовой области стока  $L_D = 10$  мкм; дрейфовая область стока модели содержит 2 полосы n-типа и 3 полосы р-типа, ширина n-полос и центральной р-полосы равна  $Y$ . Крайние р-полосы имеют ширину  $Y/2$ . Распределение концентрации примесей в полосах n- и р-типа принято равномерным, а величина концентрации равна  $N$ . Влияние толщины плёнки кремния на электрические характеристики транзисторной структуры в данной работе не исследовалось.

Электрические параметры модели SJ-LDMOS транзисторной структуры определялись по вольт-амперным характеристикам, которые, в свою очередь, рассчитывались путём решения методом сеток системы уравнений, состоящей из уравнения Пуассона и уравнений непрерывности для электронов и дырок. Граничные условия для данной системы уравнений задавались путём указания потенциалов на контактах стока, истока и затвора. Пробивное напряжение  $U_{си\_проб}$  рассчитывалось с помощью вспомогательной двумерной модели диодной структуры с суперпереходом по вольт-амперной характеристике как напряжение, при котором ток стока лавинообразно возрастает на несколько порядков.

На первом этапе проведена проверка выполнения критерия (19), а именно рассчитаны пробивные напряжения диодных структур с различной шириной полос дрейфовой области. Длина дрейфовой области постоянна и равна 10 мкм, концентрация примесей в полосах  $5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Результаты расчёта представлены в таблице 3.

Таблица 3

Пробивное напряжение диодной структуры при различной ширине полос дрейфовой области стока

	$Y = 0,2Y_{max}$	$Y = 0,5Y_{max}$	$Y = 0,8Y_{max}$	$Y = Y_{max}$	$Y = 1,2Y_{max}$	$Y = 1,5Y_{max}$
$Y$ , мкм	0,26	0,65	1,03	1,29	1,55	1,94
$U_{си\_проб}$ , В	235	228	187	33,6	32,3	26,2

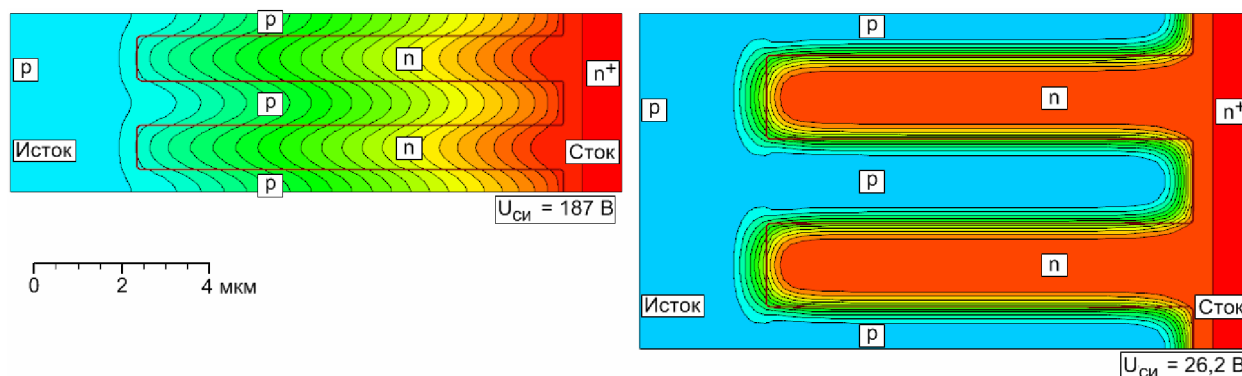


Рис. 3

Эквипотенциальные линии при пробое в структурах с шириной полос дрейфовой области  $Y = 0,8 Y_{max}$  (слева) и  $Y = 1,2 Y_{max}$  (справа)



Как следует из представленных результатов, критерий (19) выполняется достаточно точно. На рис. 3 приведены эквипотенциальные линии при пробое для структур с шириной полос  $Y = 0,8Y_{max}$  и  $Y = 1,2Y_{max}$ . Дрейфовая область стока с шириной полос, равной  $0,8Y_{max}$ , обедняется полностью (рис. 3 слева). При ширине, равной  $1,2Y_{max}$ , полосы обедняются лишь частично, вдоль полос наблюдаются необеднённые участки с постоянным потенциалом (рис. 3 справа). Пробивное напряжение диодной структуры при полном обеднении полос (187 В) существенно выше, чем при неполном обеднении полос дрейфовой области стока (26,2 В).

На втором этапе моделирования рассчитаны пробивные напряжения модели диодной структуры при конструктивных параметрах, аналогичных представленным в таблице 2. Результаты расчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4

Пробивные напряжения сток-исток модели диодной структуры с суперпереходом, реализованной в САПР ISE TCAD

$L_D$ , мкм	10						20	30	40
	1	3	5	7	10	30	5		
$N$ , $10^{16}$ см $^{-3}$									
$U_{си\_проб}$ , В при $Y = 0,9Y_{max}$	136	135	141	150	152	188	205	216	228
$U_{си\_проб}$ , В при $Y = 0,5Y_{max}$	220	228	228	229	222	224	365	433	447
$U_{си\_проб}$ , В при $Y = 1$ мкм	236	227	194	29,6	25,9	12,6	302	347	348

Пробивное напряжение диодной структуры при ширине полос близкой к критической значительно ниже, чем рассчитанное с помощью выражения (15). Как показал анализ распределения интенсивности ударной ионизации в диодных структурах в режиме пробоя, при ширине полос близкой к критической существенно возрастает интенсивность лавинной генерации носителей на границе между торцами р-полос и п<sup>+</sup>-стоковой областью. Соответственно пренебрежение влиянием указанных участков, принятое в качестве одного из допущений при выводе выражения (15), в данном случае неправомерно и выражение (15) даёт неточный результат. Таким образом, критерий (19) даёт несколько завышенные значения для максимальной ширины полос дрейфовой области стока.

Моделирование в среде TCAD показывает значительно более медленный сопровождающийся насыщением рост пробивного напряжения диодной структуры с увеличением длины дрейфовой области стока, чем это следует из выражения (15).

На третьем этапе моделирования с целью оценки электрических параметров SJ-LDMOS транзисторных структур проведено сравнение сопротивления сток-исток в открытом состоянии  $R_{си}$  и тока насыщения стока  $I_{си\_нас}$  для SJ-LDMOS и обычной классической LDMOS транзисторных структур. В качестве обычной LDMOS транзисторной структуры использована трёхмерная модель с конструктивными параметрами, аналогичными модели SJ-LDMOS структуры, за исключением того, что дрейфовая область стока равномерно легирована примесью n-типа. Ширина модели обычной LDMOS транзисторной структуры выбрана равной 1 мкм для удобства последующей нормировки электропараметров. Концентрация примеси в дрейфовой области стока модели обычной LDMOS транзисторной структуры выбрана равной  $1 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ , так как при большей концентрации дрейфовая область стока не обедняется полностью и пробивное напряжение существенно снижается. При указанной концентрации пробивное напряжение сток-исток составило 207 В.

Сопротивление сток-исток рассчитывалось при напряжении затвор-исток  $U_{зи} = U_{пор} + 10 В$  и напряжении сток-исток  $U_{си} = 1 В$ . Максимальный ток стока рассчитывался при  $U_{зи} = U_{пор} + 10 В, U_{си} = 1 В$ . В этом случае сопротивление сток-исток в открытом состоянии обычной LDMOS транзисторной структуры составило 304,9 кОм, ток насыщения стока – 17,6 мкА.

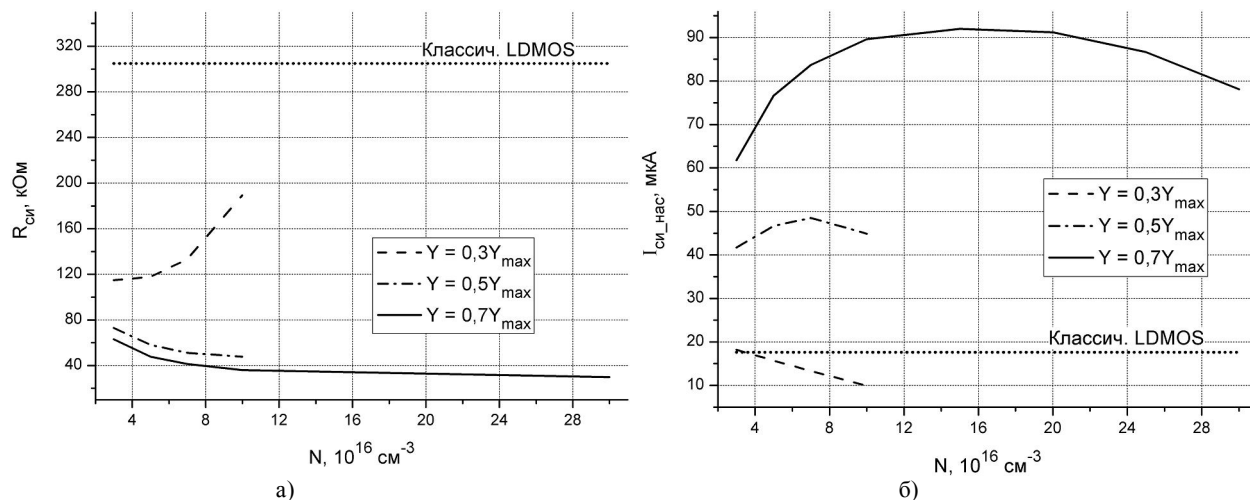


Рис. 4

Зависимости удельных значений сопротивления сток-исток (а) и тока насыщения стока (б), нормированных на 1 мкм ширины транзисторной структуры, от концентрации примесей в полосах дрейфовой области стока

Расчётные значения  $R_{си}$  и  $I_{си\_нас}$  модели SJ-LDMOS транзисторной структуры, нормированные на 1 мкм ширины транзисторной структуры, показаны на рис. 4 в виде зависимостей от концентрации примесей в полосах.

Как видно из представленных результатов расчётов, чрезмерное уменьшение ширины полос ухудшает рассмотренные электрические характеристики транзисторной структуры, а увеличение ширины, наоборот, улучшает. Также увеличение концентрации примесей в полосах более  $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  нецелесообразно в связи с уменьшением тока насыщения стока. За счёт существенно большей концентрации примесей в дрейфовой области стока использование SJ-LDMOS транзисторных структур позволит по сравнению с обычными LDMOS структурами при той же ширине затвора снизить  $R_{си}$  в 6-10 раз и увеличить  $I_{си\_нас}$  в 3-5 раз. С точки зрения достижения максимальных значений  $U_{си\_проб}$  и минимальных значений  $R_{си}$ , оптимальной будет ширина полос дрейфовой области стока  $Y = (0,6-0,7)Y_{max}$ .

На четвертом этапе моделирования SJ-LDMOS транзисторных структур исследовано влияние разброса ширины полос дрейфовой области стока и концентраций примесей в них на пробивное напряжение сток-исток. Влияние разброса на другие электропараметры транзисторных структур существенно слабее и потому в данной работе не рассматривалось.

Влияние разброса ширины полос исследовалось путём моделирования пробивного напряжения двумерной диодной структуры с суперпереходом при отклонении ширины n-полосы  $Y_n$  от  $-20\%$  до  $+20\%$  относительно  $Y_n = 0,5Y_{max}$ . Ширина p-полосы фиксирована и равна  $Y_p = 0,5Y_{max}$ . Концентрации примесей  $N$  в n- и p-полосах одинаковы. Расчёт проведён для двух значений концентрации примесей  $N$ :  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Результаты расчёта представлены на рис. 5а.

Влияние разброса концентрации примесей в полосах рассчитано аналогичным образом: отклонение концентрации примеси в n-полосах  $N_d$  изменялось в пределах от

-20% до +20% относительно начального значения, равного фиксированной концентрации примеси в р-полосах  $N_a$ . Расчёт проведён для двух значений  $N_a$ , равных  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Ширина  $Y$  n- и p-полос одинакова и равна  $0,5Y_{max}$ . Результаты расчёта представлены на рис. 5б.

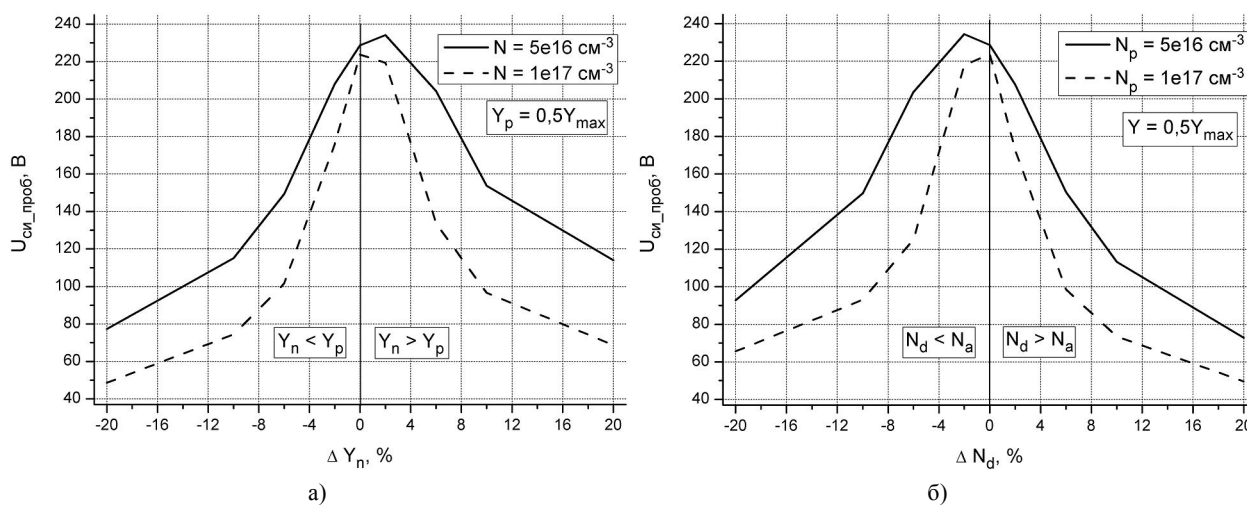


Рис. 5

Влияние разброса ширины полос дрейфовой области стока (а) и концентрации примесей в них (б) на пробивное напряжение сток-исток

Пробивное напряжение SJ-LDMOS транзисторных структур, как это видно по зависимостям на рис. 5, весьма чувствительно к разбросу ширины полос дрейфовой области и концентраций примесей в них. При этом чувствительность возрастает с ростом концентрации примесей в полосах. В публикациях [1,2] также отмечается эта характерная особенность SJ-LDMOS структур. Вследствие данной особенности характера зависимости пробивного напряжения сток-исток от воспроизводимости технологических параметров дрейфовой области стока для реализации SJ-LDMOS транзисторов необходима чрезвычайно прецизионная технология.

### Заключение

Представленные аналитические выражения, позволяющие рассчитать пробивное напряжение сток-исток в закрытом состоянии КНС SJ-LDMOS транзисторных структур, дают хорошее качественное и количественное соответствие результатам численного моделирования. Данные выражения могут быть также использованы для предварительных оценок параметров SJ-LDMOS транзисторных структур на основе монокристаллического кремния. Получен критерий выбора ширины полос дрейфовой области стока при заданной концентрации примесей в них, достаточная точность которого подтверждается численным моделированием. Для наиболее полной реализации возможностей SJ-LDMOS транзисторных структур необходима концентрация примесей в полосах дрейфовой области на уровне  $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , при этом ширина полос должна составлять 60%-70% от критической ширины, при которой начинается пробой p-n-перехода между полосами, то есть 0,50-0,25 мкм. В этом случае КНС SJ-LDMOS транзисторные структуры позволяют по сравнению обычными классическими LDMOS структурами при той же ширине затвора и одинаковом значении пробивного напряжения сток-исток снизить сопротивление сток-исток в 6-10 раз и увеличить ток насыщения стока в 3-5 раз. Однако при увеличении концентрации примесей в полосах дрейфовой области возрастает

---

чувствительность пробивного напряжения к разбросу ширины полос и концентраций примесей в них. Эта закономерность создаёт определённые технологические трудности в практической реализации SJ-LDMOS транзисторов.

### *Литература*

1. Nassif-Khalil S. G. Super Junction LDMOST using an insulator substrate for Power Integrated Circuits / S. G. Nassif-Khalil, C. A. T. Salama // U.S. Patent 101117, 698. – 2002.
2. Nassif-Khalil S. G. SJ/RESURF LDMOST / S. G. Nassif-Khalil, C. A. T. Salama, L. Z. Hou // IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 51, July 2004, №. 7, pp. 1185-1191.
3. Официальный сайт компании Infineon. – ([www.infineon.com](http://www.infineon.com)).
4. Хамзин Н. Преимущества транзисторов CoolMOS в мостовых резонансных преобразователях с фазовым сдвигом. - Компоненты и технологии, 2006, №10.
5. Грехов И. В. Лавинный пробой р-п-перехода в полупроводниках / И.В. Грехов, Ю.Н. Сережкин // Л.: Энергия. – 1980. – с. 50.
6. Официальный сайт компании Synopsys. – ([www.synopsys.com](http://www.synopsys.com)).
7. Тихомиров П. Система Sentaurus TCAD компании Synopsys. Новое поколение приборно-технологических САПР / П. Тихомиров, П. Пфедфли, М. Зорзи // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – №7. – С. 89-95.

---

---

Уважаемый читатель!

Вышла в свет книга  
Филачёва А. М., Таубкина И. И., Тришенкова М. А.  
“СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И МАГИСТРАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ  
ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ФОТОЭЛЕКТРОНИКИ”

Рассмотрены итоги развития фотоэлектроники к концу первого десятилетия нашего века. Приведены типы и параметры промышленных фотоприёмников на основные спектральные диапазоны от ультрафиолетового до длинноволнового инфракрасного. Выявлены главные направления дальнейших исследований и разработок.

Книга предназначена для широкого круга читателей: специалистов - инженеров и научных работников, специализирующихся в области разработки и применения изделий фотоэлектроники и оптико-электронных систем, а также для преподавателей, студентов и аспирантов соответствующих специальностей вузов.

В связи с выходом в свет книги дальнейшая публикация данного материала в журнале “Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы” прекращается.

---

---