

# Исследование влияния конструктивно-технологических параметров мощных КНИ МОП-транзисторов на границы области безопасной работы приборов

Ю.А. Чаплыгин, Т.Ю. Крупкина, А.Ю. Красюков, Е.А. Артамонова

Московский государственный институт электронной техники, a\_kras@rambler.ru

**Аннотация** — Статья посвящена исследованию влияния конструктивных и технологических параметров планарного мощного КНИ-МОП-транзистора на область безопасной работы прибора, органичивающую режимы работы транзистора по напряжению, току и температуре. В качестве инструмента исследования использовалась система приборно-технологического моделирования.

**Ключевые слова** — Интеллектуальные силовые схемы, мощный МОП-транзистор, КНИ, область безопасной работы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений современной силовой электроники являются интеллектуальные силовые интегральные схемы (ИСИС) – монолитные ИС, содержащие на одном кристалле как мощные элементы, так и интеллектуальные компоненты: схемы управления и самозащиты силовых приборов.

При создании таких ИС возникает ряд проблем, в частности, проблема совместимости технологий изготовления мощных и маломощных элементов схемы, а также необходимость обеспечения изоляции между ними.

ИСИС, созданные на основе тонкопленочной технологии кремний-на-изоляторе (КНИ), позволяют решить обе эти проблемы, обеспечивая полную диэлектрическую изоляцию и простую КМОП-совместимую технологию для низковольтной и мощной частей схемы. Кроме того, они обладают высоким быстродействием, повышенной радиационной стойкостью и высокой плотностью упаковки элементов.

Однако при создании мощного элемента на основе данной технологии возникают проблемы, связанные с плавающим потенциалом подложки, а также с саморазогревом мощного элемента [1-2].

Эффекты плавающей подложки, связанные с особенностями реализации контакта к подложке и высоким сопротивлением слаболегированной области канала, проявляются в виде скачка выходного тока при

увеличении напряжения на стоке (кинк-эффекта) и в виде включения паразитного биполярного n-p-n- транзистора, базой которого является p-подложка, а эмиттером и коллектором - сток и исток МОП-транзистора.

Саморазогрев, связанный с наличием скрытого слоя окисла, теплопроводность которого на несколько порядков ниже, чем у кремния, может приводить как к снижению выходного тока, так и к тепловому пробую в кремнии и выгоранию алюминиевых контактов на границе с кремнием. Проблема саморазогрева особенно актуальна для мощных КНИ-транзисторов, в которых большие токи и напряжения приводят к значительному саморазогреву.

Эти факторы сильно ограничивают область безопасной работы (ОБР) мощных транзисторов, под которой понимают совокупность электрических характеристик, при соблюдении которых обеспечивается надежная работа полупроводникового ключа без существенного ухудшения его характеристик и параметров [3]. Это, в свою очередь, ограничивает область применения ИСИС.

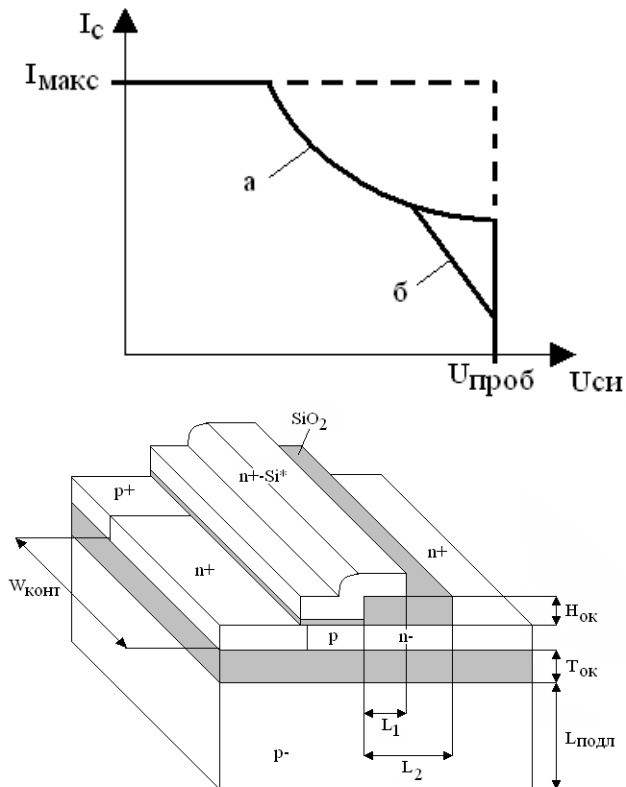
В данной работе проведено исследование влияния конструктивно-технологических параметров мощного КНИ МОП-транзистора на границы ОБР приборов. В качестве инструмента исследования была использована система приборно-технологического моделирования TCAD [4].

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ

На основе анализа типовой структуры мощного КНИ МОП-транзистора были выявлены факторы, ограничивающие его ОБР (рис. 1), конструктивно-технологические параметры, влияющие на эти факторы, и разработана параметризованная модель одной ячейки транзистора, представленная на рис.2.

ОБР мощного КНИ МОП-транзистора ограничена по напряжению лавинным пробоем перехода сток-подложка ( $U_{проб}$ ), по току – включением паразитного

биполярного транзистора ( $I_{\text{бт}}$ ) или саморазогревом транзистора до предельно допустимой температуры ( $T_n$ ).



**Рис. 1. Границы ОБР КНИ МОП-транзистора:**  
 - а – ограничение по максимальной температуре  $T_n$ ;  
 - б – ограничение по току включения паразитного биполярного транзистора  $I_{\text{бт}}$ .

**Рис. 2. Параметризованная модель мощного КНИ-МОП-транзистора**

Пробивное напряжение стока зависит от параметров слаболегированной n-области стока (пинч-резистора), канала и от параметров подэлектродного окисла ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $H_{\text{ок}}$ ). Эти параметры определяют распределение электрического поля перехода сток-подложка.

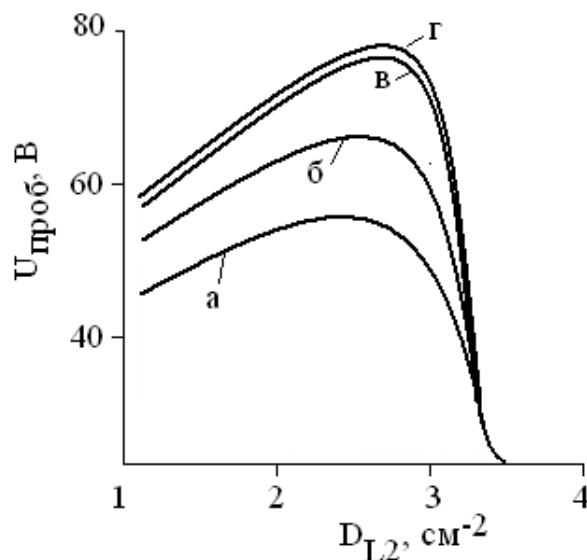
Выходной ток, при котором включается паразитный биполярный транзистор, зависит в наибольшей степени от расстояния между контактами к тонкой подложке ( $W_{\text{конт}}$ ), так как оно определяет сопротивление базовой области паразитного биполярного транзистора.

Степень саморазогрева зависит, прежде всего, от длины канала, длины пинч-резистора, а также от параметров, отвечающих за эффективность теплоотвода, а именно: от толщин скрытого окисла и объемной подложки ( $L_2$ ,  $T_{\text{ок}}$ ,  $L_{\text{подл}}$ ).

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

#### А. Зависимость пробивного напряжения от конструктивно-технологических параметров

На рис. 3 приведена зависимость пробивного напряжения от длины и дозы легирования пинч-резистора.



**Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения от дозы легирования пинч-резистора при разных длинах  $L_2$ :**

- а – 2 мкм;
- б – 2.5 мкм;
- в – 3.5 мкм;
- г – 10 мкм.

Из рис. 3 видно, что пробивное напряжение возрастает на 20 В с увеличением длины пинч-резистора от 2 до 3.5 мкм. Для каждой длины зависимости имеют экстремум в узком диапазоне доз пинч-резистора  $2.4 \cdot 10^{12} - 2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Оптимальное значение дозы соответствует равномерному распределению поля стока между двумя переходами: канал – пинч-резистор и пинч-резистор – сток, что приводит к снижению его максимального значения.

На рис. 4 и 5 представлены результаты исследования влияния параметров конструкции затвора на пробивное напряжение. Моделирование позволило выявить оптимальные значения толщины подэлектродного окисла и величины перекрытия затвором пинч-резистора. В целом введение такой формы электрода обеспечивает пробивное напряжение до 76 В при сохранении низкого сопротивления в открытом состоянии до  $2.5 \text{ МОм} \cdot \text{см}^2$ .

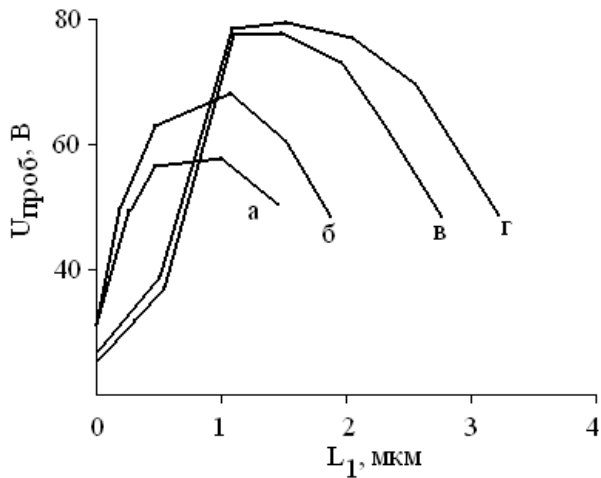


Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения от величины перекрытия затвором пинч-резистора:

- а –  $D_{L2}=2.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=2 \text{ мкм}$ ;
- б –  $D_{L2}=2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=2.5 \text{ мкм}$ ;
- в –  $D_{L2}=2.7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=3.5 \text{ мкм}$ ;
- г –  $D_{L2}=2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=4 \text{ мкм}$ .

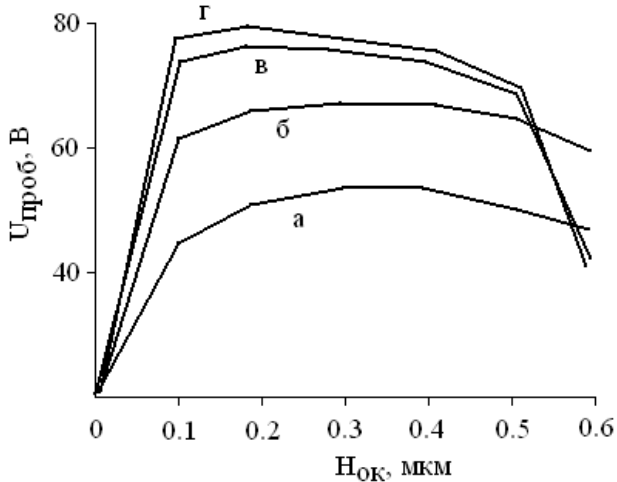


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения от толщины подэлектродного окисла:

- а –  $D_{L2}=2.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=2 \text{ мкм}$ ;
- б –  $D_{L2}=2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=2.5 \text{ мкм}$ ;
- в –  $D_{L2}=2.7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=3.5 \text{ мкм}$ ;
- г –  $D_{L2}=2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $L_2=4 \text{ мкм}$ .

*Б. Зависимость выходного тока, ограниченного включением паразитного БТ, от расстояния между контактами к тонкой подложке*

На втором этапе исследования границ области безопасной работы были получены зависимости предельных значений выходного тока, ограниченного включением паразитного биполярного транзистора, от

расстояния между контактами к тонкой подложке (рис. 6).

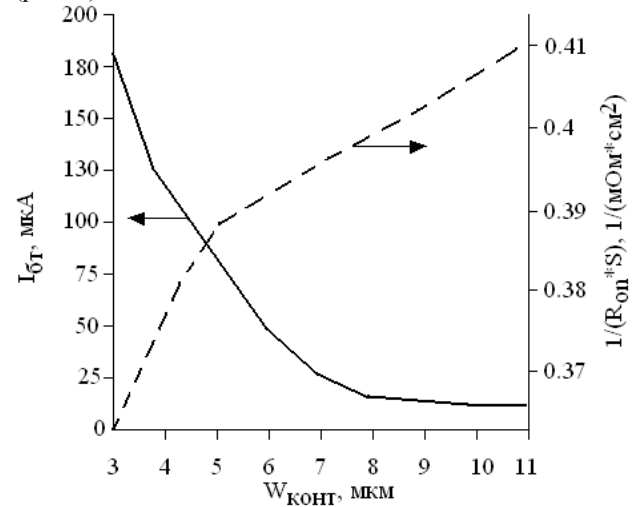


Рис. 6. Зависимость тока включения БТ от расстояния между контактами к тонкой подложке.

Видно, что предельный ток транзистора в закрытом состоянии, ограниченный включением паразитного БТ, увеличивается на порядок с уменьшением расстояния между контактами к тонкой подложке с 11 до 2 мкм. При этом сопротивление транзистора в открытом состоянии увеличивается с 2.5 до 3 МОМ\*см<sup>2</sup>.

*В. Влияние саморазогрева на границу ОБР*

На третьем этапе была исследована граница области безопасной работы, определяемая тепловыми свойствами и эффектом саморазогрева. Данная граница определяется соотношениями (1) и (2), из которых видно, что важнейшим параметром, позволяющим оценить границы температурной области безопасной работы, является тепловое сопротивление.

$$R_T = \frac{T_H - 300}{P_H} \quad (1)$$

$$I_c = \frac{P_H(T_H)}{U_{cu}} = \left( \frac{T_H - 300}{R_T} \right) \cdot \frac{1}{U_{cu}} \quad (2)$$

Считая, что вся выделяемая мощность при работе транзистора тратится на саморазогрев, расчет теплового сопротивления можно провести на основе упрощенной трехмерной модели, показанной на рисунке 7.

На рис. 8 и 9 приведены зависимости теплового сопротивления от параметров подложки и площади мощного транзистора, из которых видно, что тепловое сопротивление КНИ-транзисторов малой площади может быть уменьшено главным образом за счет уменьшения толщины скрытого окисла. В то же время тепловое сопротивление транзисторов большой площади может быть уменьшено главным образом за счет уменьшения толщины объемной Si-подложки.

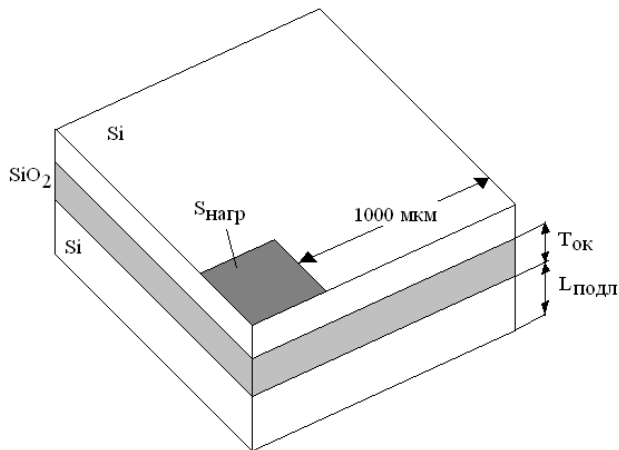


Рис. 7. Упрощенная трехмерная модель для расчета теплового сопротивления

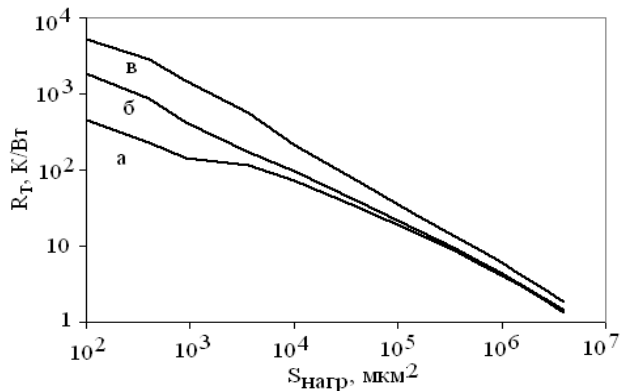


Рис. 8. Зависимость теплового сопротивления от площади мощного транзистора при разных толщинах скрытого окисла  $T_{ок}$ :

- а - 0;
- б - 0.4 мкм;
- в - 3 мкм.

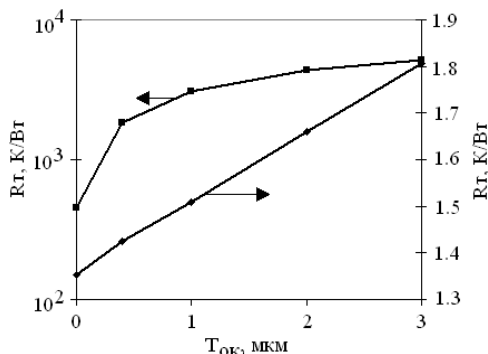


Рис. 9. Зависимость теплового сопротивления от толщины скрытого окисла для  $S_{нагр} = 10^2 \text{ мкм}^2$  (левая ось) и  $4 \cdot 10^6 \text{ мкм}^2$  (правая ось)

#### Г. Сравнение границ ОБР

На четвертом этапе исследования сравнивались границы ОБР для транзисторов различной площади. Сначала рассчитывался ток стока рассматриваемого мощного КНИ-МОП-транзистора, при котором температура прибора достигает  $100^\circ\text{C}$ , на основе соотношения (2) и данных рис.8-9. Далее рассчитывался ток включения паразитного биполярного транзистора в исследуемой структуре в соответствии с площадью прибора и рис.6. В расчетах предполагалось, что мощный транзистор имеет величину пробивного напряжения  $U_{проб}=45\text{В}$ .

Сравнение рассчитанных токов показало, что:

- для приборов малой площади основным фактором, ограничивающим ОБР транзистора по току, является ток включения паразитного биполярного транзистора;
- с увеличением площади силового элемента возрастает влияние саморазогрева, который при дальнейшем увеличении площади становится основным ограничивающим ток фактором.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием средств приборно-технологического моделирования проведено исследование влияния конструкции и технологии на область безопасной работы мощного КНИ МОП-транзистора.

В результате исследования были получены рекомендации по способам расширения области безопасной работы мощного КНИ МОП-транзистора; для типового маршрута получены оптимальные значения таких конструктивно-технологических параметров, как длина и доза легирования пинч-резистора, величина перекрытия затвором области пинч-резистора, толщина подэлектродного окисла, пленки кремния, пленки скрытого окисла и объемной подложки.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Murray A. New Power MOSFET Technology with Extreme Ruggedness and Ultra-Low Rds(on) Qualified to Q101 for Automotive Applications // International Rectifier – 2000. P.1-4.
- [2] Colinge J.P. Silicon-On-Insulator materials, VLSI Materials // Kluwer Academic Publishers - 1991.
- [3] Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи // Издательский дом Додэка-XXI – М., 2001. – С. 148 – 160.
- [4] ISE TCAD RELEASE 6.1 User's Manual V.51/ISE-Integrated Systems Engineering. Zurich, Switzerland. - 1999.