

УДК 621.382

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕКСАГОНАЛЬНЫХ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**Д. М. Бакеренкова**, инженер-испытатель АО «НИИП», г. Лыткарино, Россия;  
orcid.org/0009-0000-8670-812X, e-mail: arzamasceva.diana@mail.ru

**А. С. Петров**, к.т.н., начальник отдела № 82 АО «НИИП», г. Лыткарино, Россия;  
orcid.org/0009-0008-1198-980X, e-mail: as\_petrov@inbox.ru

*Детально рассмотрена структура гексагональных металлооксидных полупроводниковых полевых транзисторов (МОПТ) и определена ширина канала. Концентрация легирующей примеси в подложке вычислена из прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) перехода исток-подложка, площадь перехода исток-подложка, в свою очередь, определена с помощью электронного микроскопа. Концентрация носителей в дрейфовом слое для n-канального МОПТ определялась из значений пробивного напряжения диода  $p^+-n-n^+$ . Толщина подзатворного диэлектрика вычислялась из ВАХ в режиме сильнополевой инжекции Фаулер – Нордгейма.*

**Ключевые слова:** гексагональная структура, мощные МОП-транзисторы

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2025-94-213-218

### Введение

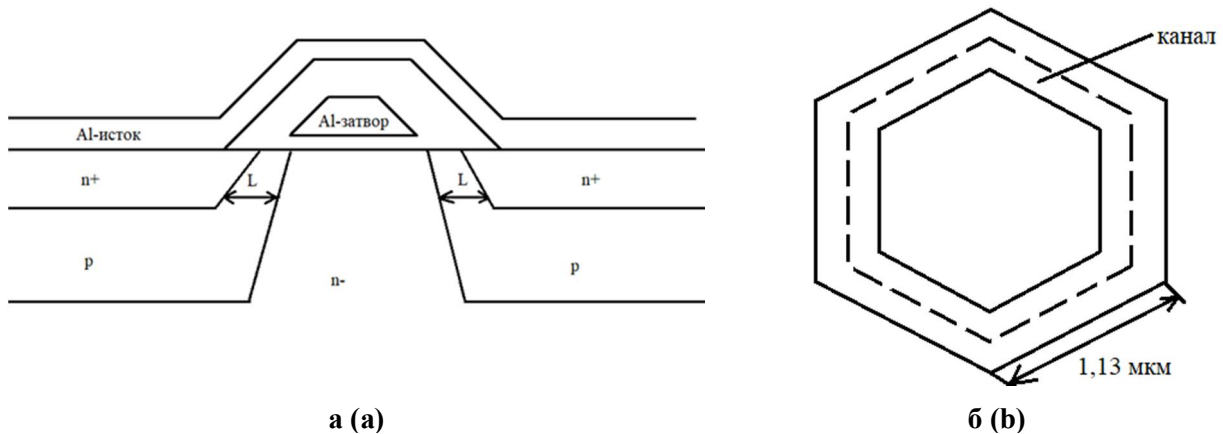
Силовые МОП-транзисторы имеют ряд значительных преимуществ перед биполярными, в частности обладают высокой температурной стабильностью и имеют низкую вероятность вторичного пробоя. Более того, силовые МОПТ имеют большие пороговые напряжения (более 3 В), что исключает случайное срабатывание при высоком уровне помех в случае использования МОПТ в инверторах и преобразователях [1-3]. На сегодняшний день все мощные МОПТ имеют вертикальную структуру, одной из её разновидностей является гексагональная структура, или HEXFET (Hexagonal Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), т. е. в одном кристалле располагаются тысячи параллельно включенных МОПТ ячеек, образующих шестиугольник. Такая конструкция позволяет оптимизировать плотность транзисторов на кристалле и снизить входное сопротивление. HEXFET транзисторы являются коммерчески доступными и регулярно используются для научных исследований и разработки более сложных устройств.

Однако в технической документации, поставляемой вместе с партией транзисторов, указываются только ключевые электрические параметры (пороговое напряжение, максимальное напряжение сток-исток, ток утечки затвора и т.д.), при этом изготовитель не раскрывает информацию о размерах различных областей транзистора и их уровнях легирования. Таким образом, возникает необходимость самостоятельно на основе микрофотографий и измеренных вольт-амперных характеристик извлечь данные параметры хотя бы для части областей полупроводниковой структуры транзистора. Цель данной работы – разработать и провести апробацию методик извлечения параметров гексагональных МОПТ.

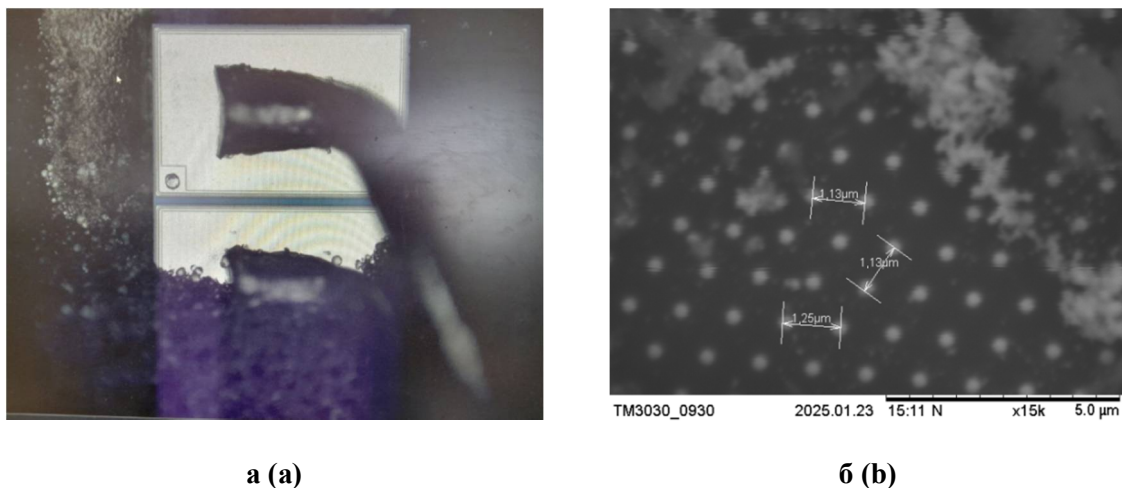
### Экспериментальные исследования

На рисунке 1 показана внутренняя структура гексагональных транзисторов, где  $L$  – это длина канала, которая для HEXFET по литературным данным составляет 0,5 мкм [4], а шириной канала является периметр шестиугольника, заключенного посередине между двумя шестиугольниками, образующими канал. В качестве исследуемого образца был выбран IRFR3710ZPbF производства Infineon Technologies (Германия). Значение длины стороны ше-

стиугольника для исследуемого образца было получено с помощью фотографии с электронного микроскопа (рисунок 2, б). Таким образом, ширина канала одной ячейки IRFR3710ZPbF составляет примерно 8,6 мкм.



**Рисунок 1 – Внутренняя структура гексагональных транзисторов:**  
**а – поперечное сечение, L – длина канала; б – единичная гексагональная ячейка**  
**Figure 1 – Internal structure of hexagonal transistors: a – cross-section, L is channel length; b – single hexagonal cell**



**Рисунок 2 – Фотография IRFR3710ZPbF с электронного микроскопа:**  
**а – до травления металла; б – после травления металла, белые точки – это истоки транзисторов**  
**Figure 1 – Electron microscope photograph of IRFR3710ZPbF: a – before metal etching; b – after metal etching; white dots indicate transistor sources**

Значение концентрации легирующей примеси в подложке может быть получено из измерений ВАХ  $I_D(V_{DS})$  при  $V_{DS} [-0,9; -0,6]$  и  $V_{GS} = 0$  (где  $I_D$  – ток стока;  $V_{DS}$  – напряжение сток-исток;  $V_{GS}$  – напряжение затвор-исток) [5]. На рисунке 3 приведена ВАХ для единичной ячейки, так как транзистор вертикальный и значение тока масштабируется, а форма ВАХ при этом не меняется. Фактически рассматривается прямая ветвь ВАХ p-n перехода:

$$I_D = J_0 \cdot S_{source-sub} \cdot (e^{m\beta V_{DS}} - 1), \quad (1)$$

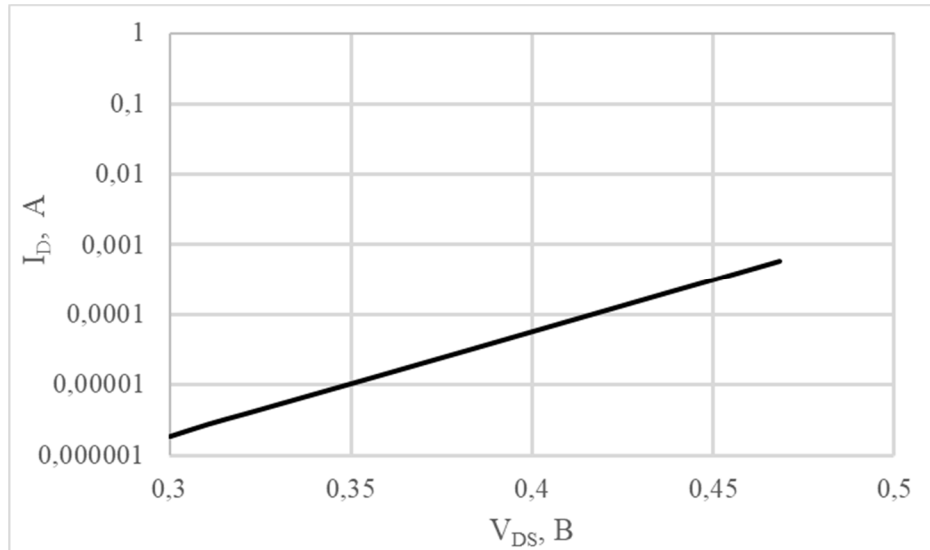
где  $J_0$  – дрейфовая компонента тока;  $S_{source-sub}$  – суммарная площадь всех переходов исток-подложка;  $m$  – фактор неидеальности;  $\beta = q/kT$ .

Для гексагональных транзисторов площадь перехода исток-подложка для простоты рассчитывается как площадь круга  $S_{source-sub} = \pi r_{source}^2$ , где  $r_{source}$  – размер гексагональной области истока, и для данного образца  $r_{source} \approx 0,3$  мкм (рисунок 2, б). Для учёта вклада всех транзисторов на пластине это значение должно умножаться на коэффициент масштабирования  $K$ , который определяется как отношение площади всей пластины к площади единичной ячейки:  $S_{пластины}/S_{ед.яч} = (1500 \cdot 1000)/(1,13 \cdot 1,13) = 1174720$  ячеек, но в каждом транзисторе две пластины (рисунок 2, а), поэтому коэффициент масштабирования равен 2349440. Коэффициент не-

идеальности  $m$  и значение дрейфовой компоненты тока  $J_0$  определяются из сравнения экспериментальной зависимости (2) и расчётной зависимости (3):

$$\ln(I_D) = \ln(J_0) + \ln(S_{\text{source-sub}}) + \ln(e^{mV_{DS}} - 1), \quad (2)$$

$$\ln(I_D) = \ln(S_{\text{source-sub}}) + \ln(e^{V_{DS}} - 1). \quad (3)$$



**Рисунок 3 – Вольт-амперная характеристика  $I_D(V_{DS})$**   
**Figure 3 – Current-voltage characteristic  $I_D(V_{DS})$**

Получив значение дрейфовой компоненты тока, можно определить концентрацию носителей в подложке:

$$J_0 = \frac{qL_n}{\tau_n} \cdot \frac{n_i^2}{N_A}, \quad (4)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $n_i$  – концентрация собственных носителей заряда ( $1,45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ );  $N_A$  – концентрация легирующей примеси в подложке;  $\tau_n$  – среднее время жизни неравновесных электронов;  $L_n$  – диффузионная длина для электронов.

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}, \quad (5)$$

где  $D_n$  – коэффициент диффузии для электронов в кремнии ( $38,85 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ).

Уравнение (4) принимает вид:

$$N_A = \frac{q \cdot \sqrt{D_n \cdot n_i^2}}{J_0 \cdot \sqrt{\tau_n}}. \quad (6)$$

Среднее время жизни неравновесных носителей вычисляется из теории Шокли – Рида – Холла [6]:

$$R - G = \sigma_{th} \cdot v_{th} \cdot N_{it} \cdot \frac{n \cdot p - n_i^2}{n + p + 2n_i ch \left( \frac{E_t - E_i}{kT} \right)}, \quad (7)$$

где  $R$  – темп рекомбинации;  $G$  – темп генерации;  $\sigma_{th}$  – сечение захвата электрона;  $v_{th}$  – тепловая скорость носителей, равная  $\sqrt{3kTm^*}$ ;  $N_{it}$  – концентрация поверхностных состояний;  $E_i$  – собственный уровень Ферми;  $E_t$  – уровень ловушек (в рассматриваемом случае  $E_i \approx E_t$ );  $n$  – концентрация электронов;  $p$  – концентрация дырок.

С другой стороны:

$$R - G = -dn / dt = n / \tau_n. \quad (8)$$

Откуда  $\tau_n$

$$\tau_n = 1 / (\sigma_{th} \cdot v_{th} \cdot N_{it}). \quad (9)$$

Для значений  $v_{th} = 1,2 \cdot 10^7$  см/с,  $\sigma_{th} = 10^{-16}$  см<sup>2</sup> (значение сечения захвата электрона на поверхностные состояния находится в пределах  $10^{-13} - 10^{-19}$  см<sup>2</sup> [7], было выбрано среднее значение) и концентрации поверхностных состояний  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> в слое толщиной 1 нм рассчитанная концентрация легирующей примеси в подложке IRFR3710ZPbF варьируется в диапазоне  $(2,7 \div 3,9) \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Концентрацию носителей в эпитаксиальном n<sup>-</sup>-слое ( $n_{эпи}$ ) можно получить из экспериментально найденного напряжения пробоя р<sup>+</sup>-n<sup>-</sup>-n<sup>+</sup> диода, поскольку именно она определяет напряжение пробоя [6]:

$$U_{проб} = 60 \cdot \left( \frac{E_g}{1.1} \right)^{1.5} \cdot \left( \frac{n_{эпи}}{10^{16}} \right)^{-0.75}, \quad (10)$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны кремния.

Полученное напряжение пробоя находится в диапазоне 113,93 – 116,36 В, что соответствует концентрации носителей в эпитаксиальном n-слое  $(4,3 \div 4,5) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

Известно, что электрическому пробую подзатворного диэлектрика МОП-структуры предшествует резкое увеличение тока утечки затвора, что вызвано инжекцией в слой SiO<sub>2</sub> электронов из кремниевой подложки или затвора в зависимости от полярности приложенного напряжения. Для МОП-структуры с толщиной слоя SiO<sub>2</sub> более 10 – 20 нм инжекция электронов в слой SiO<sub>2</sub> происходит в рамках механизма сильнополевой туннельной инжекции Фаулера – Нордгейма [8]:

$$j = A \cdot E^2 \cdot \exp(-B / E), \quad (11)$$

где  $j$  – плотность тока;  $E$  – напряженность электрического поля на границе SiO<sub>2</sub>-электрод;  $A$  и  $B$  – два коэффициента, зависящие от характеристик оксида и не зависящие от  $E$ .

Толщина подзатворного диэлектрика может быть вычислена из предпробивной ВАХ  $I_g(V_g)$  (где  $I_g$  – ток затвора;  $V_g$  – напряжение на затворе) (рисунок 4), а именно из её участка, соответствующего преобладанию инжекции Фаулера – Нордгейма в подзатворный диэлектрик. Данный участок аппроксимировался до значения тока  $I_g = 100$  нА, заявленного производителем как максимальный ток затвора, из чего был сделан вывод о величине пробойного напряжения подзатворного диэлектрика. Толщина окисла при использовании данного метода оценивалась из расчета, что диэлектрическая прочность диоксида кремния составляет  $\sim 10^7$  В/см, расчетное значение толщины диэлектрика для IRFR3710ZPbF составило 41 нм.

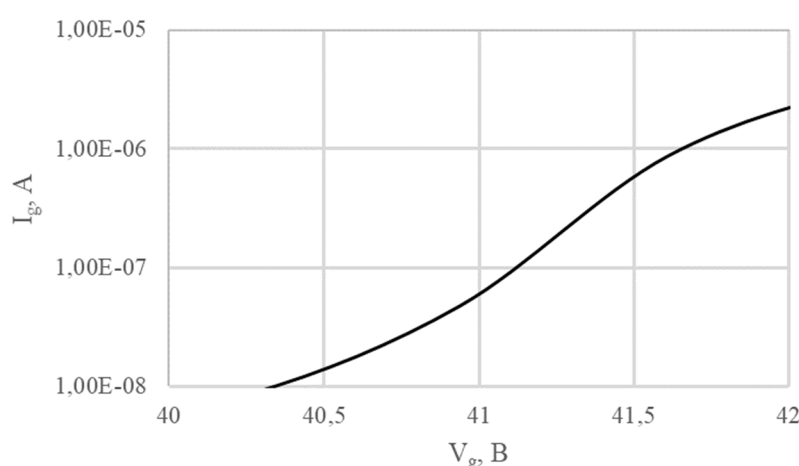


Рисунок 4 – Вольт-амперная характеристика  $I_g(V_g)$   
Figure 4 – Current-voltage characteristic  $I_g(V_g)$

### Заключение

Гексагональные транзисторы являются важным компонентом силовых микросхем и часто используются для исследований деградации мощных МОПТ в экстремальных условиях. Однако интерпретация результатов таких исследований зачастую невозможна без знания

геометрических размеров и уровней легирования областей структуры. Геометрические размеры структуры, такие как ширина канала и радиус области истока, были найдены с помощью электронной микроскопии. Концентрация легирующей примеси в подложке была рассчитана из сток-истоковой характеристики закрытого транзистора, а концентрация носителей в эпитаксиальном слое была рассчитана из напряжения пробоя диода, образованного областями подложки эпитаксиального слоя и стока. Толщина подзатворного диэлектрика была рассчитана из значения напряжения затвора, соответствующего току затвора 100 нА.

#### Библиографический список

1. **Конюшенко И.** Основы устройства и применения силовых МОП-транзисторов (MOSFET) // Силовая электроника. 2011. Т. 2. № 30. С. 10-14.
2. **Ланцов В.В., Эраносян С.** Импульсные источники питания с низким уровнем пульсаций и помех // Силовая электроника. 2008. № 17. С. 70-75.
3. **Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С.** Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключках // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 1. С. 20-39.
4. **Окснер Э.** Мощные полевые транзисторы и их применение: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 288 с.
5. **Применко А.В.** Комбинированная модель реакции мощного вертикального ДМОП-транзистора на воздействие импульсного гамма-излучения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2019.
6. **Зи С.М.** Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах, Книга 1. Пер. с англ. 2-е перераб. и доп. Изд. М.: Мир. 1984. С. 456.
7. **Белоус А.И., Солодиха В.А., Шведов С.В.** Космическая электроника. В 2-х книгах, Книга 2. Москва. Техносфера. 2015. С. 488.
8. **Wu E.Y., Vollertsen R., Sun J.** Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies, Published by John Wiley & Sons. 2009. P. 329.

UDC 621.382

## DETERMINATION OF PARAMETERS OF HEXAGONAL MOSFETS

**D. M. Bakerenkova**, testing engineer, RISI, Lytkarino, Russia;

orcid.org/0009-0000-8670-812X, e-mail: arzamasceva.diana@mail.ru

**A. S. Petrov**, PhD (in technical sciences), head of department № 82, RISI, Lytkarino, Russia;

orcid.org/0009-0008-1198-980X, e-mail: as\_petrov@inbox.ru

*The structure of hexagonal MOSFETs was considered in detail, channel width was determined. The dopant concentration in the substrate was calculated from the forward branch of source-substrate junction current-voltage characteristics, source-substrate junction area was determined using electron microscope. The carrier concentration in drift layer for n-channel MOSFET was determined from breakdown voltage values of  $p^+-n^-n^+$  diode. The thickness of gate dielectric was calculated from current-voltage characteristics in high-field Fowler-Nordheim injection mode.*

**Keywords:** hexagonal structure, power MOSFETs.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2025-94-213-218

#### References

1. **Konyushenko I.** Osnovy ustroystva i primeneniya silovykh MOP-tranzistorov (MOSFET). *Silovaya elektronika*. 2011, vol. 2, no. 30, pp. 10-14. (in Russian).
2. **Lantsov V.V., Eranosyan S.** Impul'snyye istochniki pitaniya s nizkim urovnem pul'satsiy i pomekh. *Silovaya elektronika*. 2008, no. 17, pp. 70-75. (in Russian).

3. **Babenko V. P., Bityukov V.K., Kuznetsov V.V., Simachkov D.S.** Modelirovaniye staticheskikh idinamicheskikh poter' v MOSFET-klyuchakh. *Rossiyskiy tekhnologicheskiy zhurnal*. 2018, vol. 6, no. 1, pp. 20-39. (in Russian).
4. **Oxner E.** Moshchnyye polevyye tranzistory i ikh primeneniye (Power FETs and Their Applications), M.: *Radio i svyaz'*. 1985, p. 288. (in Russian).
5. **Primenko A.V.** Kombinirovannaya model' reaktsii moshchnogo vertikal'nogo DMOP-tranzistora na vozdeystviye impul'snogo gamma-izlucheniya. *Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk*. 2019. (in Russian).
6. **Sze S.M.** Fizika poluprovodnikovyykh priborov (Physics of Semiconductor Devices): v 2-kh knigakh. Kn. 1. Izd. M.: *Mir*. 1984. 456 p. (in Russian).
7. **Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V.** Kosmicheskaya elektronika. V 2-kh knigakh, Kniga 2. Moskva. *Tekhnosfera*. 2015, p.488. (in Russian).
8. **Wu E.Y., Vollertsen R., Sun J.** Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies. *Published by John Wiley & Sons*. 2009, p. 329.