

**Петров Виктор Владимирович** – e-mail: vvp2005@inbox.ru; директор Института управления в экономических, экологических и социальных системах; д.т.н.; профессор.

**Kovalenko Dmitry Alexandrovich** – Southern Federal University; e-mail: kovalenko.mitya@yandex.ru; 2, Chekhova street, Taganrog, 347900, Russia; the department of technosphere safety, ecology and chemistry; leading engineer.

**Petrov Victor Vladimirovich** – e-mail: vvp2005@inbox.ru; the director of Institute of management in economic, ecological and social systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 541.13:621.382.323.001.57

**Л.П. Милешко, Ю.Н. Варзарев, А.В. Махаринец**

### **МОДЕЛЬ МОП ТРАНЗИСТОРА С ФОСФАТНОЙ АНОДНОЙ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКОЙ КРЕМНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА**

*Целью данной работы являлось построение и проверка математической модели МОП транзистора со встроенным каналом n-типа, применяемого в радиотехнических цепях и изготовленного с использованием одностадийной диффузии фосфора в кремний из ФАОП с различной величиной легирования. Задачей данного исследования было получение модели, которая даст приемлемое совпадение с экспериментальными данными, и расчет параметров транзистора по этой модели. Новизной данной работы является использование математической модели, разработанной для МОП транзисторов с индуцированным каналом, для описания работы МОП транзисторов со встроенным каналом, после ее небольшой модификации. Произведенная проверка подтвердила возможность такого использования. Построена модель МОП транзистора со встроенным каналом n-типа, созданного при помощи диффузии фосфора в кремний из анодных оксидных пленок. Рассчитаны параметры полевого транзистора: удельная емкость подзатворного диэлектрика, удельная крутизна и ток стока. Показано, что данная модель дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Вследствие минимизации операций техпроцесса изготовления таких транзисторов, ожидается повышенная повторяемость их параметров, пониженный коэффициент шума (минимальное количество высокотемпературных обработок позволяет снизить количество дефектов структуры кремния). Предложенный вариант модели может быть использован для изготовления транзисторов для работы в радиотехнических цепях, особенно в режиме усиления малых сигналов, например, в малошумящих усилителях. В этом случае региональность модели не играет роли, поскольку в таких схемах транзисторы не выходят из режима насыщения, а простота модели позволит быстро получить результат.*

*Модель МОП транзистора; подзатворный диэлектрик; фосфатные анодные оксидные пленки кремния*

**L.P. Mileshko, Yu.N. Varzaryov, A.V. Makharinets**

### **MODEL OF MOSFET WITH PHOSPHATE ANODIC OXIDE SILICON FILM AS A GATE DIELECTRIC**

*The purpose of this study is construction and verification of mathematical model of MOSFET with integrated n-type channel, than can be used in radio circuits, and is manufactured using a one-step diffusion of phosphorus into the silicon from phosphoric anodic oxide film with different values of doping. The objective of this study was to obtain a model that will give a reasonable agreement with the experimental data and to calculate parameters of transistor according to this model. The novelty of this work is the use of a mathematical model developed for the MOS transistors with induced channel, to describe the work of MOSFETs with integrated channel, after a slight modification. Examination confirmed the possibility of such use. A model of the MOSFET with integrated n-channel created by diffusion of phosphorus in the silicon from anodic oxide films*

*was proposed. This parameters of the FET were calculated: capacitance of gate dielectric, trans conductance and drain current. It is shown that this model gives a satisfactory agreement with the experimental data. Due to minimization of technical processes of manufacturing operations, it is expected to increase the repeatability of parameters, low noise ratio (minimum number of high-treatment operations decreases number of defects in the silicon structure). The proposed model can be used for manufacturing transistors for operation in radio connections, especially in small-signal gain mode, for example, low-noise amplifiers. In this case, the regional model is irrelevant, cause transistors in such schemes do not exit from saturation, and simplicity of such model allows to get the result quickly.*

*Model of MOS transistor; gate dielectric; phosphate anodic oxide films of silicon.*

**Введение.** Впервые конструкция и технология изготовления МОП транзистора с применением фосфатных анодных оксидных пленок кремния (ФАОП) в качестве диффузанта для создания встроенного канала n-типа и подзатворного диэлектрика была описана в работе [1].

Другим перспективным способом формирования подзатворного диэлектрика кремниевых МОП транзисторов является анодное электролитическое легирование фосфором термических оксидных пленок кремния наноразмерной толщины [2]. Кроме того, для получения подзатворного диэлектрика может применяться также реанодирование анодных оксидных пленок в легирующих электролитах [3]. Выбор режимов изготовления областей истока и стока может осуществляться по результатам исследований, приведенных в работе [4].

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время в недостаточной мере освещены вопросы моделирования МОП транзисторов со встроенным каналом, изготовленных с применением ФАОП, в то время как модели МОП транзисторов с индуцированным каналом описаны достаточно полно.

Показано, что путем модификации известной модели МОП транзистора с индуцированным каналом можно построить адекватную модель для варианта МОП транзистора со встроенным каналом, а также рассчитать его параметры: удельную емкость подзатворного диэлектрика, удельную крутизну и ток стока. Проведенная проверка подтвердила корректность такой модификации.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Длина канала была выбрана равной 15 мкм и была поставлена задача вывести формальную модель level1, SPICE типа, построенную на основе порогового напряжения, а затем проверить ее на соответствие экспериментальным результатам.

Изготовление МОП транзисторов по все более тонким технологиям выявляет новые физические эффекты в транзисторных структурах и приводит к усложнению компактных моделей [5]. Так, модель level1 подходила для транзисторов с длиной канала > 5 мкм, level2 – 2 мкм, level3 – 1 мкм, BSIM1 – 0,8 мкм, BSIM2 – 0,25 мкм, BSIM3 v3 – 0,15 мкм, BSIM4 – менее 0,1 мкм [6].

Число моделей МОП транзисторов сейчас превышает 100. Эти модели отличаются по количеству применяемых параметров и у адекватной модели параметры не должны коррелировать. Достоверность существующих моделей остается недостаточно высокой и поэтому постоянно ведутся работы по их совершенствованию [7].

В компактных моделях употребляют один из трех подходов:

- ◆ на основе порогового напряжения (длина канала > 0,1 мкм);
- ◆ на заряде инверсионного слоя;
- ◆ на поверхностном потенциале.

Учитывая выбранный для моделирования объект и имеющуюся информацию о нем [1] было принято решение использовать формальную модель level1, SPICE типа, построенную на основе порогового напряжения.

Уравнения выбранной модели длинноканальных МОП транзисторов имеют следующий вид: [8–11]

$$I_c = \beta[(V_3 - V_n)V_c - \frac{1+\eta}{2}V_c^2](1 + \lambda V_c), \text{ при } V_c < V_{\text{нас}} \quad (1)$$

$$I_c = \frac{\beta}{2(1+\eta)}(V_3 - V_n)^2(1 + \lambda V_c), \text{ при } V_c \geq V_{\text{нас}} \quad (2)$$

$$V_{\text{нас}} = \frac{V_3 - V_n}{1 + \eta}, \quad (3)$$

где  $I_c$  – ток стока,  $V_3$  – потенциал затвора относительно истока,  $V_c$  – потенциал стока относительно истока,  $V_n$  – пороговое напряжение,  $V_{\text{нас}}$  – напряжение насыщения (граница по оси  $V_c$  между крутой и пологой областями семейства выходных ВАХ),  $L$  – коэффициент влияния параметров подложки на ВАХ,  $\beta$  – удельная крутизна,  $\lambda$  – коэффициент модуляции длины канала,  $\eta$  – коэффициент влияния подложки на ВАХ.

Удельная крутизна определяется выражением

$$\beta = c_0 \mu W / L, \quad (4)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей заряда в канале,  $W$  и  $L$  – ширина и длина канала.

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon / d, \quad (5)$$

где  $C_0$  – удельная емкость подзатворного диэлектрика,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $d$  – толщина подзатворного диэлектрика.

Поскольку ВАХ снимались без подачи смещения на подложку, принимаем  $\eta=0$  [12].

Таким образом, уравнения принимают вид:

$$I_c = \beta[(V_3 - V_n)V_c - \frac{1}{2}V_c^2], \text{ при } V_c < V_{\text{нас}} \quad (6)$$

$$I_c = \frac{\beta}{2}(V_3 - V_n)^2, \text{ при } V_c \geq V_{\text{нас}} \quad (7)$$

Уравнение параболы [13], разграничивающей крутую и пологую области ВАХ (области “резистивную” и насыщения):

$$I_c = \frac{\beta}{2}(V_c)^2. \quad (8)$$

Учитывая, что исследуемый МОП-транзистор имеет встроенный канал [14], в формулах вместо  $V_n$  ставим  $V_o$  (напряжение отсечки), их физический смысл одинаков – появление тока стока (обычно принимается величина в 10 мкА); при этом выражения  $(V_3 - V_n)$  и  $(V_3 - V_o)$  имеют один и тот же смысл – эффективное напряжение затвора.

Определим параметры модели для предложенного МОП транзистора.

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon / d = \frac{8.85 * 10^{-12} * 3.9}{70 * 10^{-9}} = 0,493 * 10^{-3} \Phi / \text{м}^2, \quad (9)$$

где 3,9 – относительная диэлектрическая проницаемость  $\text{SiO}_2$ .  $\mu$  (подвижность носителей в канале) определим из полученных экспериментально выходных ВАХ транзистора, используя формулу:

$$\mu = \frac{2I_c L}{C_o W (V_3 - V_o)^2}, \quad (10)$$

Поскольку  $\mu$  слабо зависит от  $V_3$ ,  $\mu$  рассчитываем в одной точке ВАХ, а именно при  $V_3 = -6\text{В}$ ,  $I_c = 0,15\text{В}$ ,  $V_o = -9\text{В}$ .

$$\mu = \frac{2I_c L}{C_o W (-6 - V_o)^2} = \frac{2 * 0,15 * 10^{-3} * 15 * 10^{-6}}{0,493 * 10^{-3} * 400 * 10^{-6} * 9} = 2,54 * 10^{-3} \frac{\text{м}^2}{\text{с} * \text{с}}$$

Тогда удельная крутизна  $\beta$  будет равна [14]:

$$\beta = C_o \mu \frac{W}{L} = 0,493 * 10^{-3} * 2,54 * 10^{-3} * \frac{400 * 10^{-6}}{15 * 10^{-6}} = 0,034 * 10^{-3} \text{ А/В}^2. \quad (11)$$

В нашем случае модель приобретает вид:

$$I_c = 0,034 * 10^{-3} [(V_3 - V_o)V_c - \frac{1}{2}V_c^2], \text{ при } V_c < V_{\text{нас}} \quad (12)$$

$$I_c = 0,017 * 10^{-3} (V_3 - V_o)^2 (1 + \lambda V_c), \text{ при } V_c \geq V_{\text{нас}}. \quad (13)$$

Для нахождения коэффициента  $\lambda$  можно воспользоваться эмпирической формулой [21]:

$$\lambda = 0,25 * L^{-1} \text{ при } L \leq 25 \text{ мкм}$$

$$\lambda = 0,01 \text{ при } L > 25 \text{ мкм, } L \text{ при этом выражается в мкм.}$$

Тогда  $\lambda = 0,25 * L^{-1} = \frac{0,25}{15} = 0,017$ . Также можно воспользоваться формулой

[22], где вместо  $(1 + \lambda V_c)$  используется:

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\varepsilon_{si}\varepsilon_0(V_c + V_{II} - V_3)}{qN}}}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_{si}$  – диэлектрическая проницаемость Si (11,68),  $q$  – заряд электрона,  $N$  – исходная концентрация носителей в канале ( $\approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$  или  $10^{21} \text{ м}^{-3}$ , при  $V_3 = 0$ ).

Приведем выражение (14) к виду для МДП транзистора со встроенным каналом и учтем, что  $V_c = 20\text{В}$ ,  $V_3 = 0\text{В}$ ,  $V_o = -9\text{В}$ .

$$1 - \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\varepsilon_{si}\varepsilon_0(V_c + V_{II} - V_3)}{qN}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{15 * 10^{-6}} \sqrt{\frac{2 * 11,68 * 8,85 * 10^{-12} * 11}{1,6 * 10^{-19} * 10^{21}}}} = \frac{1}{1 - \frac{3,77 * 10^{-6}}{15 * 10^{-6}}} = 1,34.$$

Приравнивая  $(1 + \lambda V_c) = 1,34$ , получаем

$$\lambda = \frac{1,34 - 1}{V_c} = \frac{0,34}{20} = 0,017,$$

что совпадает с ранее полученным результатом.

Окончательно модель примет вид:

$$I_c = 0,034 * 10^{-3} [(V_3 - V_o)V_c - 0,5V_c^2], \text{ при } V_c < V_{\text{нас}} \quad (15)$$

$$I_c = 0,017 * 10^{-3} (V_3 - V_o)^2 (1 + 0,017V_c), \text{ при } V_c \geq V_{\text{нас}}. \quad (16)$$

Для оценки точности модели вычислим значения  $I_c$  для следующих значений  $V_3$ : -6 В, -4,5 В, -3 В, -1,5 В, 0 В, 1,5 В, 3 В, при этом  $V_c=20$  В (режим насыщения [15–20]).

$$\begin{aligned} I_{c,-6В} &= 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 1,34 = 0,20 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,15 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,-4,5В} &= 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5^2 \cdot 1,34 = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,43 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,-3В} &= 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot 6^2 \cdot 1,34 = 0,81 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,78 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,-1,5В} &= 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot 7,5^2 \cdot 1,34 = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (1,25 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,0В} &= 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot 9^2 \cdot 1,34 = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (1,82 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,1,5В} &= 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot 10,5^2 \cdot 1,34 = 2,48 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (2,50 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,3В} &= 0,017 \cdot 10^{-3} \cdot 12^2 \cdot 1,34 = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (3,28 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \end{aligned}$$

В скобках указаны экспериментальные данные. Как видно, данная модель имеет достаточную точность (отклонения составляют менее 10 %), что является достоинством моделей такого типа (региональных или “кусочных”). Заметим, что точность увеличивается с увеличением  $I_c$ . Эти же данные представлены в графическом виде на рис. 1.

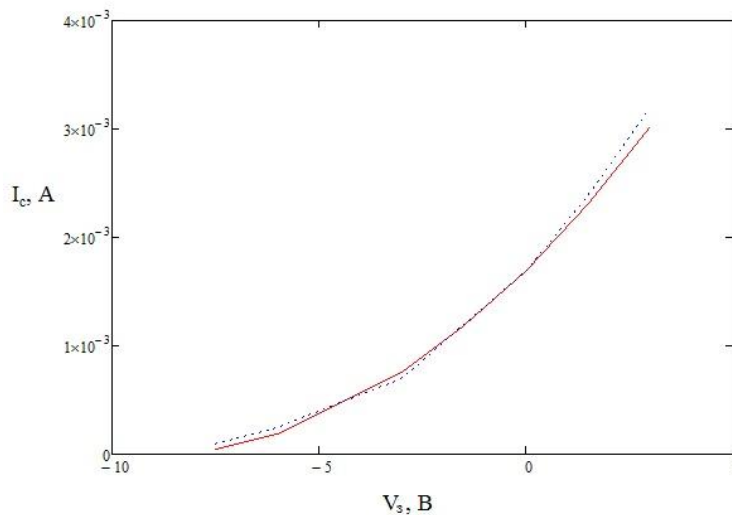


Рис. 1. Зависимость тока стока от напряжения на затворе. Сплошной линией представлены данные, рассчитанные по предложенной модели, а пунктирной линией – экспериментальные данные

Теперь проверим модель при  $V_c < V_{нас}$  при тех же  $V_3$ ,  $V_c$  выберем равным 2 В.

$$\begin{aligned} I_{c,-6В} &= 0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 4 = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,16 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,-4,5В} &= 0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 7 = 0,23 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,24 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,-3В} &= 0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,36 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,-1,5В} &= 0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 13 = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,46 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,0В} &= 0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 16 = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,57 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,1,5В} &= 0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 19 = 0,65 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,68 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \\ I_{c,3В} &= 0,034 \cdot 10^{-3} \cdot 22 = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ А} && (0,80 \cdot 10^{-3} \text{ А}) \end{aligned}$$

Здесь, как видно, точность тоже достаточно высокая.

Таким образом, построенная модель дает вполне приемлемое совпадение с экспериментальными данными согласно [1].

**Выводы.** Построена модель МОП транзистора со встроенным каналом n-типа, созданного с помощью диффузии фосфора в кремний из анодных оксидных пленок.

Рассчитаны параметры МОП транзистора: удельная емкость подзатворного диэлектрика, удельная крутизна и ток стока.

Показано, что данная модель дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными и может быть использована для расчетов параметров МОП транзисторов данного типа.

Данная модель может быть применена для расчета параметров и изготовления транзисторов, применяемых в малошумящих усилителях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бредихин И.С., Волкова Т.А., Милешко Л. П., Палиенко А.Н., Чистяков Ю.Д. Применение анодных окисных пленок, легированных фосфором, для изготовления МОП-транзисторов // В кн.: «Активируемые процессы технологии микроэлектроники». – Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1976. – Вып. 2. – С. 206-209.
2. Милешко Л.П. Анодное электролитическое легирование термических окисных пленок кремния // ФХОМ. – 2002. – № 6. – С. 55-59.
3. Милешко Л.П., Авдеев С.П. Реанодирование анодных окисных пленок в легирующих электролитах // ФХОМ. – 2004. – № 4. – С. 61-63.
4. Милешко Л.П., Авдеев С.П. Влияние процесса анодного окисления кремния на параметры диффузии примесей бора и фосфора из легированных окисных пленок // Известия вузов. Электроника. – 2004. – № 5. – С. 25-32.
5. Antognetti P., Massobrio G. (Eds.) Semiconductor Device Modeling with SPICE. – New York: McGraw-Hill, 1987.
6. Гергель В.А., Марасанов А.В., Орешкин Г.И. Простая аналитическая модель короткоканального МОП-транзистора для численного моделирования схмотехнических задач // Микроэлектроника. – 1989. – Т. 18. – Вып. 2. – С. 162-165.
7. Соловьев А.К. Проектирование БИС в КМОП базисе: Учебное пособие по курсу "Проектирование БИС", по направлению "Электроника и микроэлектроника". – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 108 с.
8. Tsvividis Y.P., Suyama K. MOSFET modeling for analog circuit CAD: Problems and prospects // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1994. – Vol. 34, No. 3. – P. 210-216.
9. Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для микро- и нанoeлектроники. – М.: Физматлит, 2010. – 408 с.
10. McAndrew C.C. Practical modeling for circuit simulation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1998. – Vol. 34, No. 3. – P. 439-448.
11. Бирюков В.Н. Диагностика моделей барьерной емкости диода // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 9. – С. 1144-1148.
12. Бирюков В.Н. Четырехпараметрическая компактная модель полевого транзистора с коротким каналом // Труды Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии-2010». Ч. 2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – С. 114-115.
13. Бирюков В.Н., Пилипенко А.М. Диагностика статических моделей диода // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 5. – С. 604-610.
14. Bourenkov V., McCarthy K.G., Mathewson A.A. A Hybrid Table/Analytical Approach to MOSFET modeling // Proceedings of International Conference on Microelectronic Test Structures. – Monterey, CA, 2003. – P. 142-147.
15. Пилипенко А.М., Бирюков В.Н. Исследование параметров полевых транзисторов с изолированным затвором при низких температурах // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – № 9. – С. 66-70.
16. Валшев К.А., Королев М.А. Цифровые интегральные схемы на МДП-транзисторах. – М.: Советское радио, 1971. – 384 с.
17. Бочаров Л.Н. Полевые транзисторы. – М.: Энергия, 1976. – 80 с.
18. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х книгах. Кн. 1: Пер. с англ. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
19. Свистова Т.В. Твердотельная электроника: учеб. пособие. – Воронеж: ГОУВПО "Воронежский государственный технический университет", 2006. Ч. 2. – 173 с.

20. Бордаков Е.В., Пантелеев В.И. Методические указания к выполнения лабораторных работ по дисциплине «Проектирование и конструирование полупроводниковых приборов и интегральных схем». – Воронеж: ВГТУ, 2005. – 45 с.
21. Аллен Ф., Санчес-Синэнско Э. Электронные схемы с переключаемыми конденсаторами // Радио и связь. – 1989. – С. 15-17.
22. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: учебное пособие. – Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2004. – 312 с.

## REFERENCES

1. Bredikhin I.S., Volkova T.A., Mileshko L. P., Palienko A.N., Chistyakov Yu.D. Primenenie anodnykh okisnykh plenok, legirovannykh fosforom, dlya izgotovleniya MOP-tranzistorov [The application of anodic oxide films doped with phosphorus, for the manufacture of MOS transistors], *V kn.: «Aktiviruemye protsessy tekhnologii mikroelektroniki»* [In the book "Activated processes of microelectronics technology"]. Taganrog: Izd-vo TRTI, 1976, Issue 2, pp. 206-209.
2. Mileshko L.P. Anodnoe elektroliticheskoe legirovanie termicheskikh oksidnykh plenok kremniya [Anode electrolytic alloying thermal oxide silicon films], *FKhOM* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2002, No. 6, pp. 55-59.
3. Mileshko L.P., Avdeev S.P. Reanodirovanie anodnykh oksidnykh plenok v legiruyushchikh elektrolitakh [Renderovanie anodic oxide films in the alloy electrolytes], *FKhOM* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2004, No. 4, pp. 61-63.
4. Mileshko L.P., Avdeev S.P. Vliyanie protsessa anodnogo okisleniya kremniya na parametry diffuzii primesey bora i fosfora iz legirovannykh oksidnykh plenok [The influence of the process of anodic oxidation of silicon on the parameters of impurity diffusion of boron and phosphorus doped oxide films], *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2004, No. 5, pp. 25-32.
5. Antognetti P., Massobrio G. (Eds.) *Semiconductor Device Modeling with SPICE*. New York: McGraw-Hill, 1987.
6. Gergel' V.A., Marasano A.V., Oreshkin G.I. Prostaya analiticheskaya model' korotkokanal'nogo MOP-tranzistora dlya chislennogo modelirovaniya skhemotekhnicheskikh zadach [A simple analytical model korotkovolnovoi the MOS transistor for circuit simulation numerical tasks], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 1989, Vol. 18, Issue 2, pp. 162-165.
7. Solov'ev A.K. Proektirovanie BIS v KMOP bazise [LSI design in CMOS basis]: *Uchebnoe posobie po kursu "Proek-tirovanie BIS", po napravleniyu "Elektronika i mikroelektronika"* [The textbook for the course "LSI Design" in the direction "electronics and microelectronics"]. Moscow: Izd-vo MEI, 2003, 108 p.
8. Tsvividis Y.P., Suyama K. MOSFET modeling for analog circuit CAD: Problems and prospects, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1994, Vol. 34, No. 3, pp. 210-216.
9. Denisenko V.V. Kompaktnye modeli MOP-tranzistorov dlya mikro- i nanoelektroniki [Compact models of MOS transistors for micro - and nanoelectronics]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 408 p.
10. McAndrew C.C. Practical modeling for circuit simulation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1998, Vol. 34, No. 3, pp. 439-448.
11. Biryukov V.N. Diagnostika modeley bar'ernoy emkosti dioda [Diagnostics of models of the barrier capacitance of the diode], *Radiotekhnika i elektronika* [Radioengineering and Electronics], 2009, Vol. 54, No. 9, pp. 1144-1148.
12. Biryukov V.N. Chetyrekhparametricheskaya kompaktnaya model' polevogo tranzistora s korotkim kanalom [Compact four-parameter model field-effect transistor with a short channel], *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Nanotekhnologii-2010»* [Proceedings of International scientific and technical conference "Nanotechnologies 2010"]. Part 2. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, pp. 114-115.
13. Biryukov V.N., Pilipenko A.M. Diagnostika sticheskih modeley dioda [Diagnosis of static models of a diode], *Radiotekhnika i elektronika* [Radioengineering and Electronics], 2009, Vol. 54, No. 5, pp. 604-610.
14. Bourenkov V., McCarthy K.G., Mathewson A.A. A Hybrid Table/Analytical Approach to MOSFET modeling, *Proceedings of International Conference on Microelectronic Test Structures*. Monterey, CA, 2003, pp. 142-147.

15. *Pilipenko A.M., Biryukov V.N.* Issledovanie parametrov polevykh tranzistorov s izolirovannym zatvorom pri nizkikh temperaturakh [Study of parameters of field-effect transistors with insulated gate at low temperatures], *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki [Achievements of Modern Radioelectronics]*, 2011, No. 9, pp. 66-70.
16. *Valiev K.A., Korolev M.A.* Tsifrovye integral'nye skhemy na MDP-tranzistorakh [Digital integrated circuits for MOS transistors]. Moscow: Sovetskoe radio, 1971, 384 p.
17. *Bocharov L.N.* Polevye tranzistory [Field-effect transistors]. Moscow: Energiya, 1976, 80 p.
18. *Zi S.* Fizika poluprovodnikovyykh priborov [Physics of semiconductor devices]. In 2 books. Book 1: Translation from English. 2nd ed. – Moscow: Mir, 1984, 456 p.
19. *Svistova T.V.* Tverdotel'naya elektronika: ucheb. Posobie [Solid-state electronics: study guide]. Voronezh: GOUVPO "Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet", 2006. Part 2, 173 p.
20. *Bordakov E.V., Pantelev V.I.* Metodicheskie ukazaniya k vypolneniya laboratornykh работ po distsipline «Proektirovanie i konstruirovaniye poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh skhem» [Methodical instructions to laboratory works on discipline "Design and construction of semiconductor devices and integrated circuits"]. Voronezh: VGTU, 2005, 45 p.
21. *Allen F., Sanches-Sinepsko E.* Elektronnyye skhemy s pereklyuchaemyimi kondensatorami [Electronic circuit with switched capacitors], *Radio i svyaz' [Radio and Communication]*, 1989, pp. 15-17.
22. *Gurtov V.A.* Tverdotel'naya elektronika: uchebnoye posobie [Solid-state electronics: study guide]. Petrozavodsk: Izd-vo Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta, 2004, 312 p.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Г.Ю. Джуплина.

**Варзарёв Юрий Николаевич** – Южный федеральный университет; e-mail: varzarevyuv@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371940; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Махаринец Александр Владимирович** – e-mail: mav1creator@mail.ru; тел.: 88634371624; кафедра техносферной безопасности, химии и экологии; аспирант.

**Милешко Леонид Петрович** – e-mail: mileskho.leon@yandex.ru; кафедра техносферной безопасности, химии и экологии; д.т.н.; профессор.

**Varzaryov Yuri Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: varzarevyuv@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371940; the department of nanotechnology and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Makharinets Alexander Vladimirovich** – e-mail: mav1creator@mail.ru; phone: +78634371624; the department of technospheric safety, ecology and chemistry; postgraduate student.

**Mileskho Leonid Petrovich** – e-mail: mileskho.leon@yandex.ru; the department of technospheric safety, ecology and chemistry; dr. of eng. sc.; professor.