

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 621.3.087.92

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-345-352

Влияние расположения контактов сток-истоковых областей на параметры беспереходного КНИ МОП-транзистора

М.А. Королёв¹, А.С. Ключников², Д.И. Ефимова¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²АО «НИИ молекулярной электроники», г. Москва, Россия

mikor33@rambler.ru

Беспереходные МОП-транзисторы (МОП БПТ) имеют ряд преимуществ перед традиционными с точки зрения простоты конструкции, технологии изготовления и снижения влияния короткоканальных эффектов на характеристики прибора. Однако известные экспериментальные нанопроволочные МОП БПТ характеризуются высокими подпороговыми токами из-за возникновения эффекта паразитного биполярного транзистора в закрытом состоянии. В работе предложена конструкция прибора с низкой концентрацией примеси в рабочем теле и сильнолегированными контактами сток-истоковых областей. С помощью приборно-технологического моделирования в системе TCAD проведено исследование влияния расположения сток-истоковых контактных областей относительно электрода затвора на основные параметры КНИ МОП БПТ. С использованием программы TCAD Sentaurus Structure Editor построены структурные модели КНИ МОП БПТ с различной толщиной спейсера, определяющей расстояние между электродом затвора и контактами сток-истоковых областей. Рассчитаны проходные ВАХ при напряжении на стоке 0,1 и 1,2 В. По проходной характеристике с напряжением питания на стоке 1,2 В построены зависимости подпороговых токов, токов насыщения и соотношения токов во включенном состоянии к току в выключенном состоянии от расположения сток-истоковых областей. В результате исследования обнаружен и объяснен новый эффект, названный «короткостокковым», резко снижающий пороговое напряжение. Данный эффект проявляется под влиянием ОПЗ p^+-n -перехода между контактом и стоком на зарядовое состояние области канала, когда расстояние между электродом затвора и контактом становится меньше 100 нм. При формировании планарных КНИ МОП БПТ по технологии 90 нм необходимо создавать сток-истоковые области размером 250 нм и задавать концентрацию в пленке в n -канальном транзисторе $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в p -канальном – $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Это позволит снизить подпороговые токи прибора до 10^{-13} А/мкм и получить соотношение токов во включенном и выключенном состояниях 10^8 . Определен оптимальный размер

толщины спейсера (от 0,16 до 0,34 мкм), при котором минимизировано влияние контактных n^+ - n -переходов и последовательного сопротивления сток-истоковых областей на параметры КНИ МОП БПТ.

Ключевые слова: беспереходной МОП-транзистор; подпороговый ток; межзонное туннелирование; сток-истоковые области

Для цитирования: Королёв М.А., Ключников А.С., Ефимова Д.И. Влияние расположения контактов сток-истоковых областей на параметры беспереходного КНИ МОП-транзистора // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 345–352. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-345-352

Impact of Location of Drain-Source Areas Contacts on Junctionless JLT MOSFETs Parameters

М.А. Korolev¹, А.С. Klyuchnikov², D.I. Efimova¹

¹National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia

²JSC «NIIME», Moscow, Russia

mikor33@rambler.ru

Abstract: The junctionless MOSFETs have a number of advantages compared to traditional ones in terms of the design simplicity, manufacturing technology and reducing the impact of short-channel effects upon the device characteristics. However, the known experimental nanowire JLT MOSFETs have high threshold currents due to parasitic bipolar transistor appearance in a closed state. A design of the device with a low impurity concentration in the working body and having the strongly doped contacts to the drain-source areas has been proposed. Using the device-technological modeling in the TCAD system, the influence of the contacts relative to the gate electrode on the main parameters of SOI MOS JLT has been studied. With the use of the Sentaurus Structure Editor the structural model of JLT MOSFETs with various thicknesses of a spacer, which determines the distance between the gate electrode and the contact drain-source areas, have been built, and the calculations of the I-V characteristics at a drain voltage of 0.1 V and 1.2 V have been performed. Transient VAC at the drain voltage 0.1 and 1.2 V have been calculated. By the transient characteristic with supply voltage at the drain of 1.2 V the curves of the threshold currents, the saturation currents and current-to-current ratio in the off state versus the size of the drain-source areas have been plotted. As a result of the research a new short-drain effect, dramatically reducing the threshold voltage, has been discovered and explained. This effect becomes apparent under the impact of SCR of the n^+ - n transition between the contact and the drain on the channel region charge, when the distance between the gate electrode and the contact becomes less than 100 nm. While forming planar JLT MOSFETs according to the 90 nm technology it is necessary to create the drain-source regions with the size of 25 nm and to assign the concentration in the n -channel transistor $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and in p -channel one – $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. This will allow reducing the subthreshold currents of the device to $10^{-13} \text{ A}\mu\text{m}$ and to obtain a current ratio in the open and closed state 10^8 . The most optimal size of the spacers thickness is from 160 to 340 nm,

with which the influence of the contact n^+n transitions and sequential resistance of the drain-source regions on JLT MOSFET parameters, has been determined.

Keywords: junctionless MOS-transistor; subthreshold current; inter-zone tunneling; drain/source regions

For citation: Korolev M.A., Klyuchnikov A.S., Efimova D.I. Impact of location of drain-source areas contacts on junctionless JLT MOSFETs parameters. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 345–352. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-345-352

Введение. Беспереходной МОП-транзистор (МОП БПТ) создается на основе КНИ-структуры, в которой области канала, стока и истока находятся в пленке кремния, легированной одним типом примеси [1–6]. В случае КНИ МОП БПТ с каналом n -типа при достаточно большой контактной разности потенциалов между пленкой кремния n -типа и затвором p -типа и малой толщине пленки кремния возникает полное обеднение тела прибора носителями заряда. Это происходит в результате перекрытия ОПЗ нижней и верхней МОП-структур всей толщины пленки даже при нулевом потенциале на затворе. Когда напряжение, приложенное к затвору, становится равным контактной разности потенциалов между затвором и каналом, МОП-структура затвора транзистора переходит в состояние плоских зон. При дальнейшем увеличении напряжения на затворе толщина ОПЗ уменьшается и возникает объемный внутренний проводящий канал, сопротивление которого зависит от потенциала на затворе. Данный прибор представляет собой управляемый с помощью полевого эффекта кремниевый пленочный резистор. ВАХ такого транзистора (выходная и проходная) аналогичны характеристикам традиционного МОП-транзистора с инверсионным каналом.

МОП БПТ имеет преимущества по сравнению с обычным МОП-транзистором. Во-первых, конструкция МОП БПТ значительно проще и, соответственно, проще процесс ее формирования. Во-вторых, в рабочей области нет p – n -переходов. В результате не возникают ОПЗ переходов, а также связанные с ними короткоканальные эффекты, для подавления которых приходится усложнять структуру транзистора, вводя дополнительные области (LDD, Halo и Pocket). В-третьих, проводящий канал МОП БПТ при неполном обеднении изолирован ОПЗ затворов от ловушек на границах раздела полупроводник – диэлектрик, обеспечивая высокую подвижность носителей заряда.

Известные конструкции МОП БПТ имеют равномерно легированное тело прибора с высокой концентрацией примеси в нем. Это приводит к увеличению токов утечки в выключенном состоянии из-за возникновения межзонного туннелирования носителей из валентной зоны канала в зону проводимости стока в области перехода канал – сток в результате возникновения высокого уровня напряженности электрического поля. Это, в свою очередь, приводит к возникновению эффекта паразитного биполярного транзистора, что резко увеличивает подпороговый ток прибора. Высокая концентрация примеси в пленке кремния также снижает подвижность носителей заряда в канале прибора.

Уменьшение концентрации легирующей примеси до уровня ниже 10^{17} см^{-3} в КНИ МОП БПТ позволяет снизить подпороговый ток до 10^{-13} А/мкм при значении тока насыщения, сопоставимом со значением тока для традиционных МОП-транзисторов, вследствие увеличения подвижности носителей заряда в канале [7]. Особенностью конструкции такого КНИ МОП БПТ в отличие от обычного МОП БПТ является наличие дополнительных областей контактов к истоку и стоку с высоким уровнем легирования примесью. Необходимость создания таких областей обусловлена низким уровнем легирования тела прибора, и они введены с целью снижения сопротивления контактов к

стоку и истоку. В работе [1] расстояние от контактных областей до электрода затвора, определяющее размеры слаболегированных участков истока и стока, принято фиксированным и равным 250 нм. Однако расположение контактных областей относительно электрода затвора влияет на параметры транзистора. В случае увеличения расстояния между электродом затвора и контактами увеличивается последовательное сопротивление прибора, приводящее к уменьшению тока насыщения и, соответственно, к ухудшению быстродействия транзистора. При уменьшении этого расстояния могут возникнуть не исследованные ранее эффекты, возможно существенно влияющие на параметры транзистора.

Моделирование КНИ МОП БПТ. С целью изучения влияния расположения контактных областей на основные параметры КНИ МОП БПТ проведено приборно-технологическое моделирование транзистора в системе TCAD [8]. В качестве объекта исследования выбран КНИ МОП БПТ, сформированный на основе отечественной базовой технологии изготовления традиционного инверсионного МОП-транзистора с проектными нормами 90 нм. В ходе исследования разработана структура для планарного КНИ МОП БПТ с учетом основных конструктивно-технологических параметров данного маршрута. Схематичное изображение структуры представлено на рис.1.

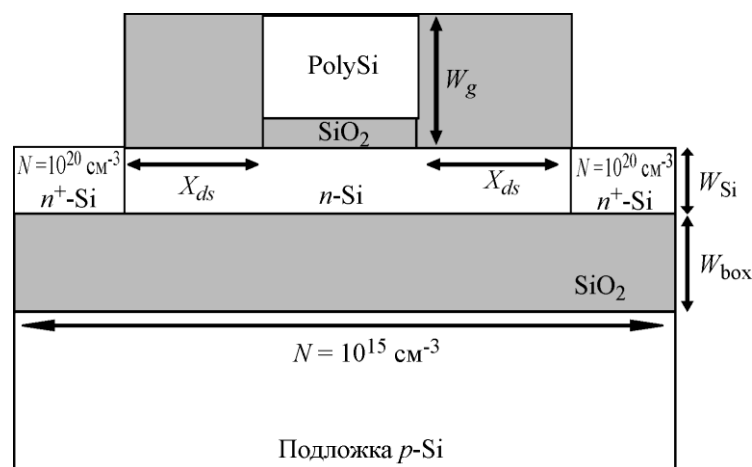


Рис.1. Схематичное изображение планарного КНИ МОП БПТ с конструктивно-технологическими параметрами по нормам технологии 90 нм ($W_g = 150$ нм – толщина поликремниевого электрода затвора; $W_{Si} = 70$ нм – толщина рабочего слоя n-Si; $W_{box} = 150$ нм – толщина изолирующего слоя SiO_2) [2]

Fig.1. Schematic representation of a planar SOI MOS JLT, with design and technological parameters using 90 nm technology ($W_g = 150$ nm; $W_{Si} = 70$ nm; $W_{box} = 150$ nm) [2]

Для определения зависимости характеристик транзистора от конструктивно-технологических параметров в системе Synopsys Sentaurus TCAD построена 2D-модель КНИ МОП БПТ и рассчитаны проходные и выходные характеристики устройства. Для исследования влияния расположения контактов к сток-истоковым областям относительно электрода затвора на параметры транзистора необходимо задать определенное значение концентрации легирующей примеси в пленке. Как показано в работе [7], оптимальное значение с точки зрения порогового напряжения и подпорогового тока из возможного диапазона концентрации легирующей примеси $10^{15} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ составляет $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, и это значение принято при последующих расчетах.

Результаты расчета. С учетом заданных параметров определены характеристики транзистора с разной толщиной спейсера X_{ds} , определяющей расстояние между электродом затвора и контактов к сток-истоковым областям. При оценке порогового на-

пряжения на сток подавалось напряжение 0,1 В, а напряжение на затворе менялось от минус 1 до плюс 2 В. Полученные проходные характеристики транзистора представлены на рис.2,а.

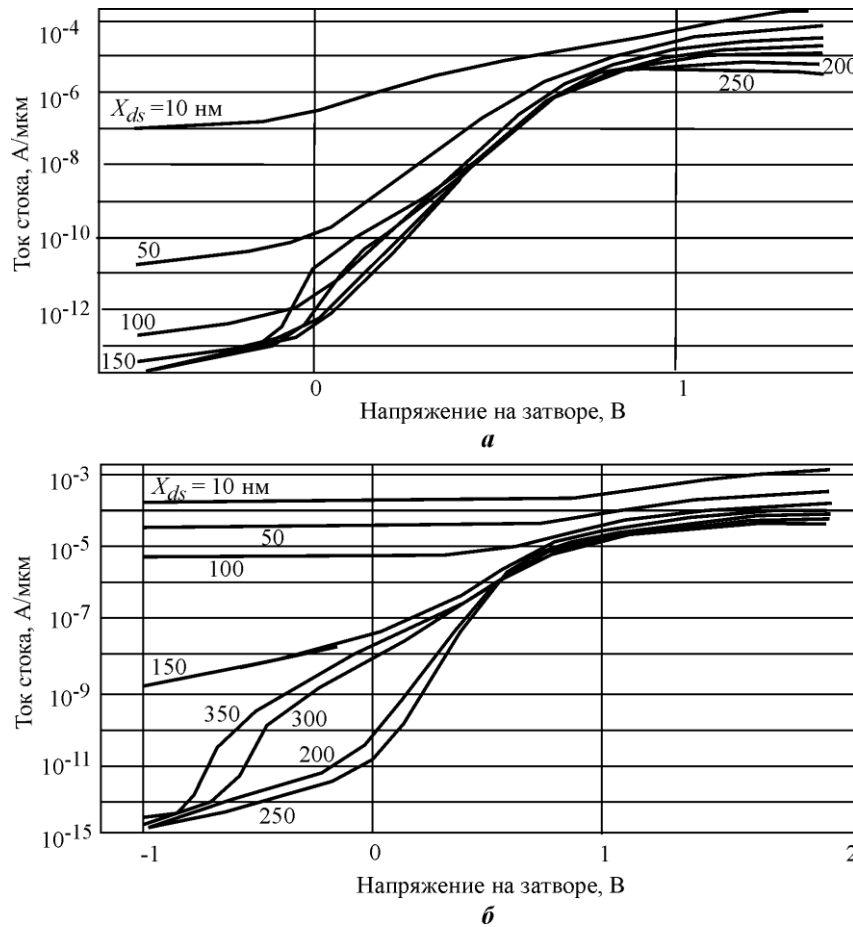


Рис.2. Проходная ВАХ КНИ МОП БПТ с разной толщиной спейсеров X_{ds} :

а – $U_d = 0,1$ В; б – $U_d = 1,2$ В

Fig.2. Transient CVC of the JLT with different spacers thicknesses X_{ds} :

а – $U_d = 0.1$ V; б – $U_d = 1.2$ V

По проходной характеристике определено влияние толщины спейсера на пороговое напряжение прибора (рис.3,а). График данной зависимости имеет максимум при толщине спейсера X_{ds} около 0,1 мкм. При дальнейшем уменьшении расстояния между контактами сток-истоковых областей и электродом затвора пороговое напряжение резко снижается. Такой характер зависимости можно объяснить тем, что при близком расположении контактов сток-истоковых областей с электродом затвора ОПЗ n^+ – n -перехода контактов влияет на зарядовое состояние канала. Это, в свою очередь, приводит к снижению порогового напряжения. По аналогии с термином «короткоканальный» данный эффект можно назвать «короткостоковым». При увеличении расстояния между контактами сток-истоковых областей и электродом затвора более чем на 100 нм ОПЗ n^+ – n -перехода контакта перестает существенно влиять на зарядовое состояние канала. При дальнейшем увеличении этого расстояния пороговое напряжение несколько снижается из-за увеличения сопротивления истока и стока. В связи с обнаружением короткостокового эффекта необходимо провести анализ влияния расстояния между контактами сток-истоковых областей и электродом затвора на остальные основные характеристики транзистора.

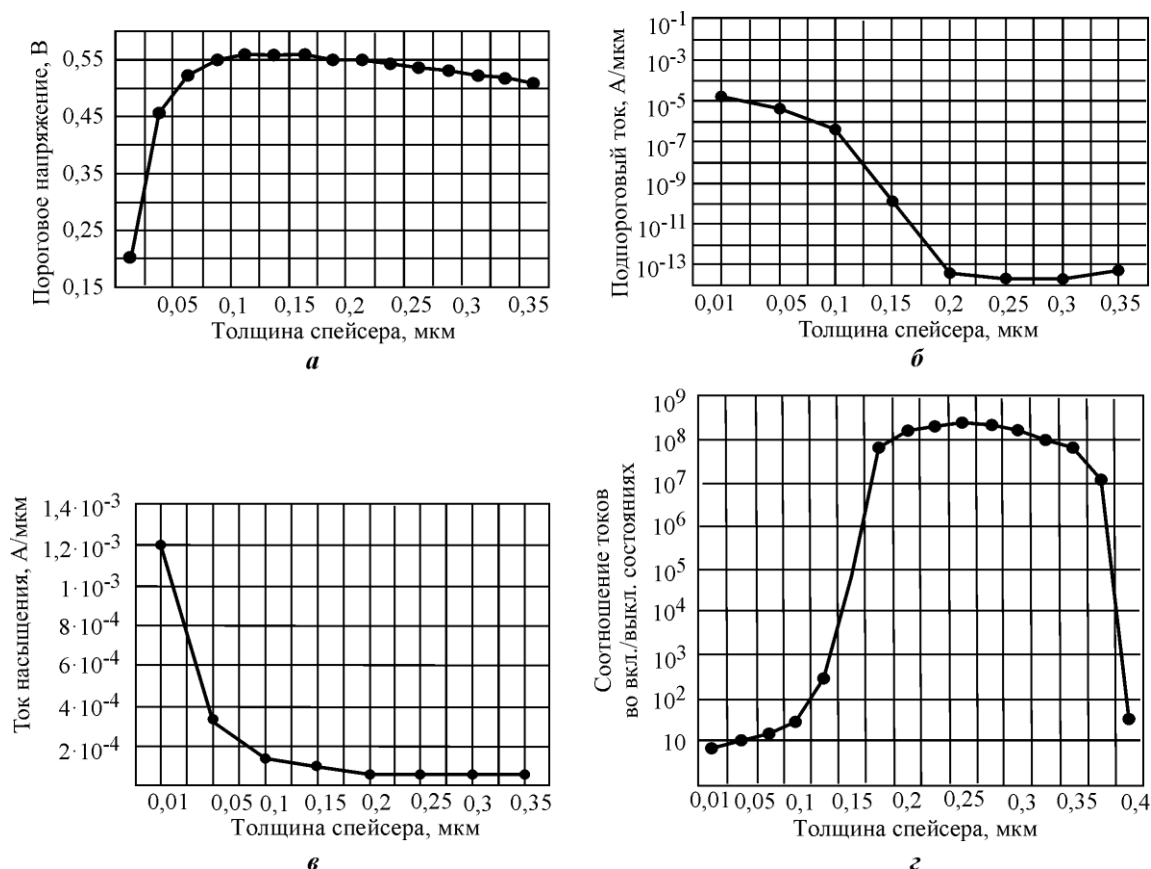


Рис.3. Зависимости порогового напряжения (а), подпорогового тока (б), тока насыщения (в) и соотношения токов во вкл./выкл. состояниях транзистора (г) от толщины спейсера
 Fig.3. Dependences of the threshold voltage (a), subthreshold currents on the spacers thickness (b), saturation current on the spacers thickness (c) and on/off state current ratio of the transistor (d) on the spacers thickness

Проходная ВАХ КНИ МОП БПТ при напряжении на стоке 1,2 В (установленное для технологии 90 нм) представлена на рис.2,б. Из проходной характеристики следует, что при малых толщинах спейсеров подпороговые токи большие, что обусловлено снижением порогового напряжения вследствие влияния короткостокowego эффекта. Расчетная зависимость подпорогового тока от толщины спейсеров представлена на рис.3,б. Из графика видно, что при размере сток-истоковых областей от 0,2 до 0,3 мкм подпороговые токи минимальны. Следовательно, для наилучших характеристик транзистора необходимо выбрать толщину спейсера именно в этом диапазоне.

Важным параметром КНИ МОП БПТ является ток насыщения, на который существенно влияет сопротивление сток-истоковых областей. Расчетная зависимость тока насыщения от толщины спейсера представлена на рис.3,в. Из рисунка следует, что максимальное значение ток насыщения имеет при толщине спейсера до 0,1 мкм. Однако, как показано ранее, именно на этом участке на канал КНИ МОП БПТ действует ОПЗ $n^+ - n$ -перехода, и он не может использоваться при формировании прибора. При увеличении толщины спейсера наблюдается уменьшение тока насыщения, что обусловлено соответствующим увеличением сопротивления сток-истоковых областей.

Практический интерес представляет соотношение токов во включенном и выключенном (вкл./выкл.) состояниях транзистора. Значение данного параметра важно при работе транзистора в микроощном режиме в СБИС высокой степени интеграции. Рас-

считанная зависимость соотношения токов во включенном и выключенном состояниях от толщины спейсера приведена на рис.3,г. Из графика следует, что при значениях X_{ds} от 0,16 до 0,34 мкм наблюдается максимальное соотношение токов. При меньших толщинах спейсеров соотношение токов падает из-за возрастания подпорогового тока вследствие проявления короткостокowego эффекта, приводящего к уменьшению порогового напряжения. При больших толщинах спейсеров соотношение токов уменьшается вследствие снижения тока насыщения из-за возрастания последовательного сопротивления прибора.

Заключение. В результате исследования разработанного планарного КНИ МОП БПТ обнаружен и объяснен новый короткостоковой эффект, обусловленный влиянием ОПЗ n^+-n -перехода контакта к стоку на зарядовое состояние области канала, примыкающей к стоку. Эффект приводит к резкому уменьшению порогового напряжения при снижении расстояния между электродом затвора и контактом стока менее 100 нм. При формировании планарных беспереходных КНИ МОП БПТ с каналом n -типа по технологии 90 нм необходимо располагать сток-истоковые области на расстоянии 250 нм от электрода затвора и создавать концентрацию примеси в пленке в n -канальном транзисторе $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Это позволяет снизить подпороговые токи прибора до 10^{-13} А/мкм при сопоставимом с традиционными МОП-транзисторами значении тока насыщения и иметь соотношение токов во включенном и выключенном состояниях 10^8 .

Литература

1. Lee C., Afzalian A., Colinge J. Junctionless multigate field-effect transistor // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 94. – No. 5. – P. 346–358.
2. Nanowire transistors without junctions / Colinge J.P. et al. // Nature Nanotechnol. – 2010. – Vol. 5. – No. 3. – P. 225–229.
3. Gundapaneni S., Bajaj M., Kottantharayil A., Murali K. Effect of band-to-band tunneling on junctionless transistors // IEEE Trans. Electron Devices. – 2012. – Vol. 60. – No. 4. – P. 1021–1030.
4. Ghosh B., Bal P., Mondal P. A junctionless tunnel field effect transistor with low subthreshold slope // Springer Science. – 2013. – P. 487–499.
5. Migita S., Morita Y., Matsukawa T., Masahara M. Experimental demonstration of ultrashort-channel junctionless FETs utilizing atomically sharp V-grooves on SOI // IEEE Trans. Nanotechnol. – 2014. – Vol. 13. – No. 2. – P. 208–215.
6. Jagadeesh Kumar M., Sahay S. Controlling BTBT induced parasitic BJT action in junctionless FETs using a hybrid channel // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2016. – Vol. 63. – No. 8. – P. 3350–3353.
7. Королёв М.А., Ключников А.С., Ефимова Д.И. Беспереходной МОП-транзистор с низким подпороговым током // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 2. – С. 186–193.
8. Королёв М.А., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А. Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – №4-5. – С. 64–71.

Поступила 05.12.2017 г.; принята к публикации 24.04.2018 г.

Королёв Михаил Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), mikor33@icloud.com

Ключников Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории приборно-технологического моделирования АО «НИИ молекулярной электроники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр-д, д. 12, стр.1), aklyuchnikov@mikron.ru

Ефимова Дарья Игоревна – магистр, стажер-исследователь кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), ef_dasha@mail.ru

References

1. C. Lee, A. Afzal, Colinge J. Junctionless multigate field-effect transistor. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, vol. 94, no. 5, pp. 346–358.
2. Colinge J.P. et al. Nanowire transistors without junctions. *Nature Nanotechnol.*, Mar. 2010, vol. 5, no. 3, pp. 225–229.
3. Gundapaneni S., Bajaj M., Kottantharayil A., Murali K. Effect of band-to-band tunneling on junctionless transistors. *IEEE Trans. Electron Devices*, Apr. 2012, vol. 60, no. 4, pp. 1021–1030.
4. Ghosh B., Bal P., Mondal P. A junctionless tunnel field effect transistor with low subthreshold slope, *Springer Science*, 2013, pp. 487–499.
5. Migita S., Morita Y., Matsukawa T., Masahara M. Experimental demonstration of ultrashort-channel junctionless FETs utilizing atomically sharp V-grooves on SOI. *IEEE Trans. Nanotechnol.* Mar. 2014, vol. 13, no. 2, pp. 208–215.
6. Jagadeesh Kumar M., Sahay S. Controlling BTBT induced parasitic BJT action in junctionless FETs using a hybrid channel. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Aug. 2016, vol. 63, no. 8, pp. 3350–3353.
7. Korolev M.A., Klyuchnikov A.S., Efimova D.I. Junctionless MOS-transistor with low subthreshold current. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 2 pp. 186–193. (In Russian).
8. Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Chaplygin Yu.A. Device-technological modeling in development of microelectronic and microsystems engineering items. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2005, no. 4-5, pp. 64–71. (In Russian).

Submitted 05.12.2017; Accepted 24.04.2018.

Information about the authors:

Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), mikor33@icloud.com.

Alexey S. Klyuchnikov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Instrument-Technological Modeling Laboratory, JSC «NIIME» (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny pr-d, 12/1), aklyuchnikov@mikron.ru

Darya I. Efimova – Master, Researcher Assistant of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), ef_dasha@mail.ru