

Беспереходной МОП-транзистор с низким подпороговым током

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 по сравнению с 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.

Разработаны структурная модель планарного КНИ МОП БПТ по нормам технологии 90 нм и маршрут математического моделирования с использованием среды Synopsys Sentaurus TCAD. Исследовано влияние концентрации примеси в пленке кремния КНИ МОП БПТ на пороговое напряжение, токи насыщения и подпороговые токи.

Результаты исследований показывают следующее. При концентрациях примеси в рабочем канале прибора менее 10^{17} см⁻³, когда отсутствует эффект межзонного туннелирования и не возникает эффект паразитного биполярного транзистора, подпороговые токи снижаются до 10^{-13} А/мкм, что существенно ниже, чем у традиционных МОП-транзисторов, при сохранении токов насыщения на приемлемом уровне.

Ключевые слова: беспереходной МОП-транзистор; подпороговый ток; межзонное туннелирование; концентрация примеси.

Для цитирования: 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. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-186-193

Junctionless MOS-Transistor with Low Subthreshold Current

M.A. Korolev¹, A.S. Klyuchnikov², D.I. Efimova¹

¹National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia

²JSC «NIIME», Moscow, Russia

mikor33@rambler.ru

Junctionless MOSFETs have a number of advantages over the traditional ones in terms of simplicity of design, manufacturing technology and reducing the impact of the short-channel effects on the device characteristics. However, the known experimental nanowire MOSFETs have high subthreshold currents due to the parasitic bipolar transistor appearance in the closed state.

A structural model of a planar SOI in accordance with the technology standards of 90 nm and the route of mathematical modeling have been developed. The influence of the impurity concentration in the SOI MOSFET silicon film on the threshold voltage, the saturation currents and subthreshold currents using TCAD environment has been investigated.

The investigation results show that if the impurity concentrations in the working body of the device is below 10^{17} cm^{-3} and there is no interband tunneling effect, and a parasitic bipolar transistor does not arise, the subthreshold currents decrease to $10^{-13} \text{ A}/\mu\text{m}$, while maintaining the saturation currents at an acceptable level, which is significantly lower than those of the conventional MOS transistors.

Keywords: junctionless MOSFET; subthreshold current; interband tunneling; impurity concentration.

For citation: Korolev M.A., Klyuchnikov A.S., Efimova D.I. Junctionless MOS-transistor with low subthreshold current // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 2. – P. 186–193. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-2-186-193

Введение. Беспереходной МОП-транзистор (МОП БПТ) [1–6] создается на основе КНИ-структуры, в которой области канала, стока и истока находятся в пленке кремния, легированной одним типом примеси. В МОП БПТ *n*-типа при достаточно большой величине контактной разницы потенциалов между каналом *n*-типа и затвором *p*-типа и малой толщине пленки кремния происходит полное обеднение канала прибора носителями заряда в результате перекрытия нижней и верхней ОПЗ даже при нулевом потенциале на затворе. Когда напряжение, приложенное к затвору, становится равным контактной разности потенциалов между затвором и каналом, структура 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. По существу, такой прибор представляет собой управляемый с помощью полевого эффекта резистор. Выходные и передаточные ВАХ МОП БПТ аналогичны характеристикам традиционного МОП-транзистора с инверсионным каналом.

Характеристики беспереходного МОП-транзистора. МОП БПТ (рис.1) имеет много преимуществ по сравнению с обычным МОП-транзистором. Конструкция такого

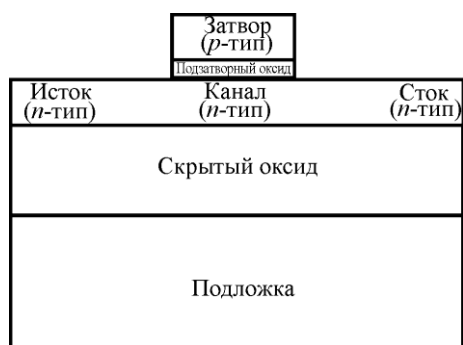


Рис. 1. Схематичная структура КНИ МОП БПТ

Fig.1. Schematic SOI MOS JLT structure

обеспечивается высокая подвижность носителей в канале устройства, так как он расположен в объеме и изолирован ОПЗ от границ раздела диэлектрик – полупроводник, где находятся поверхностные ловушки носителей зарядов.

Однако МОП БПТ имеет один существенный недостаток. Известные по публикациям МОП БПТ созданы на основе кремниевой нанопроволоки с размером канала 20×10 нм. При низкой концентрации легирующей примеси в канале прибора количество основных носителей заряда очень мало и недостаточно для работы транзистора. При таких размерах канала при концентрации примеси 10^{15} см^{-3} число атомов примеси в нем составляет 0,002, при 10^{16} см^{-3} – 0,02, при 10^{17} см^{-3} – 0,2, при 10^{18} см^{-3} – 2, при 10^{19} см^{-3} – 20. Таким образом, для возникновения проводимости необходимо увеличивать концентрацию примеси до 10^{19} см^{-3} .

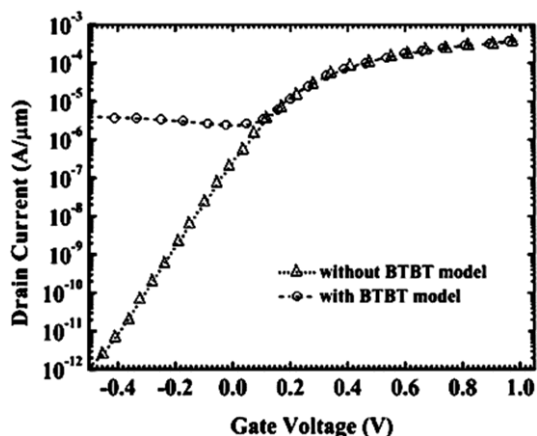


Рис.2. Сравнение передаточных ВАХ БПТ с учетом эффекта межзонного туннелирования и без учета [2]

Fig.2. Comparison of the transfer CVC of the JLT with BTBT model and without BTBT model [2]

устройства значительно проще и, соответственно, легче процесс ее формирования. В рабочей области транзистора нет $p-n$ -переходов, следовательно не возникают ОПЗ, связанные с ними. В результате отсутствуют короткоканальные эффекты, для подавления которых приходится усложнять структуру транзистора, вводя такие дополнительные области, как LDD, Halo и Rocet. При этом в отличие от традиционных МОП-транзисторов, которые могут работать либо в режиме инверсии, либо в режиме обогащения, МОП БПТ работает в режиме неполного обеднения. В результате

увеличивается концентрация примеси до 10^{19} см^{-3} . В результате высокого уровня напряженности электрического поля высокая концентрация легирующей примеси приводит к увеличению токов утечки в выключенном состоянии МОП БПТ из-за межзонного туннелирования носителей из валентной зоны канала в зону проводимости стока в области перехода канал – сток (рис.2).

Повышенные подпороговые токи обусловлены тем, что при туннелировании «зона-зона» образуются электронно-дырочные пары. Электроны переходят в область стока, а дырки накапливаются в канале, так как существует барьер для переноса дырок из канала в исток. Смещение в прямом направлении перехода исток – канал в конечном счете включает паразитный

$n-p-n$ -биполярный транзистор, что приводит к большому току стока (ток коллектора биполярного транзистора). В последние пять лет разработчики пытаются найти решение проблемы больших токов утечки в МОП БПТ в выключенном состоянии. На сегодняшний день предложено четыре способа уменьшения подпороговых токов в МОП БПТ, основанных на локальном уменьшении электрического поля в области перехода канал – сток.

Первый способ заключается в увеличении толщины подзатворного оксида на границе канала и областей стока и истока. Благодаря такой конструкции поперечное электрическое поле в области перехода канал – сток уменьшается, подавляется эффект межзонного туннелирования и подпороговые токи снижаются [3].

Во втором способе используется локальное изменение материала электрода затвора в области перехода канал – сток, приводящее к изменению контактной разницы потенциалов затвор – канал. В результате снижается величина электрического поля, а следовательно подавляется межзонное туннелирование [4].

В третьем способе применяется оболочный профиль легирования. Рабочая область транзистора представляет собой нанопроволоку круглого сечения. Центральная часть легируется малой дозой примеси, а поверхность (оболочка) – большой. При таком способе в объеме нанопроволоки с низкой концентрацией примеси на переходе канал – сток электрическое поле мало и, соответственно, отсутствует эффект межзонного туннелирования, а сильнолегированная оболочка обеспечивает необходимую проводимость канала [5].

Четвертый способ является развитием третьего – центральная часть легируется примесью противоположного оболочке типа, что снижает электрическое поле в области канал – сток. В результате межзонное туннелирование становится невозможным [6].

Представленные методы сильно усложняют технологию формирования МОП БПТ на основе нанопроволоки.

Результаты исследования. С целью решения проблемы снижения подпорогового тока МОП БПТ проведено приборно-технологическое моделирование прибора в среде Synopsys Sentaurus TCAD [7]. В качестве объекта исследования в настоящей работе выбрана планарная структура КНИ МОП БПТ с конструктивно-технологическими параметрами, соответствующими инверсионному МОП-транзистору, изготовленному по нормам технологии 90 нм. Схематичное изображение структуры представлено на рис.3.

В транзисторе используется кремниевая подложка, легированная донорной примесью с постоянной концентрацией 10^{15} см^{-3} . Верхняя поверхность кремния покрыта изолирующим слоем SiO_2 толщиной $W_{\text{box}} = 150 \text{ нм}$. Выше расположен рабочий слой $n\text{-Si}$ длиной $0,89 \text{ мкм}$ и толщиной $W_{\text{si}} = 70 \text{ нм}$. По краям слоя $n\text{-Si}$ сформированы омические контакты $n^+\text{-Si}$ с концентрацией донорной примеси $N_{\text{sub}} 10^{20} \text{ см}^{-3}$. На поверхности рабочего слоя $n\text{-Si}$ выращен подзатворный диэлектрик SiO_2 толщиной $W_{\text{ox}} = 2,1 \text{ нм}$ и сформирован поликремниевый электрод затвора толщиной $W_g = 150 \text{ нм}$. Спейсеры (боковые изолирующие накладки электрода затвора) определяют расстояния от электрода затвора до контактов областей стока и истока прибора и имеют толщину $X_{\text{ds}} = 250 \text{ нм}$.

Для исследования зависимости характеристик транзистора от конструктивно-технологических параметров КНИ МОП БПТ достаточно построить 2D модель в среде Synopsys Sentaurus TCAD и получить передаточные и выходные характеристики устройства. Для создания

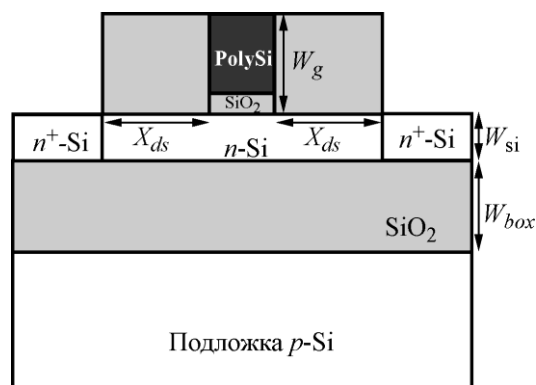


Рис.3. Схематичное изображение планарного КНИ МОП БПТ с конструктивно-технологическими параметрами по нормам технологии 90 нм

Fig.3. Schematic representation of a planar SOI MOS JLT, with design and technological parameters using 90 nm technology

структуры транзистора в программе задаются слои, их размеры и концентрация легирующей пленку примеси, а также формируются контакты. После этого программа автоматически строит расчетную сетку для последующего анализа физической модели прибора.

Для расчетов электрофизических параметров и ВАХ приборов в программе Sentaurus Device задается плотность поверхностных состояний 10^{11} см^{-2} (поверхностный заряд на границе кремния и оксида кремния). С помощью итерационного метода проводится изменение функции при вариации аргумента. Когда все контакты имеют одинаковый потенциал, устройство находится в равновесии, а плотность электронов и дырок описывается постоянным квазипотенциалом Ферми. Поэтому, наряду с электростатическим потенциалом, учет связи между квазипотенциалом Ферми и плотностью электронов и дырок достаточен для простейшего возможного моделирования устройства. Плотность электронов и дырок может быть вычислена из электронных и дырочных квазипотенциалов Ферми и наоборот.

Передаточные и выходные ВАХ строятся в программе Sentaurus Visual. Пороговое напряжение по передаточным ВАХ транзистора автоматически рассчитывается следующим образом: находится точка пересечения кривой с током, который меньше тока насыщения в 100 раз, и определяется значение напряжения в данной точке. Помимо порогового напряжения с помощью данной программы определяются подпороговые токи и токи насыщения транзистора.

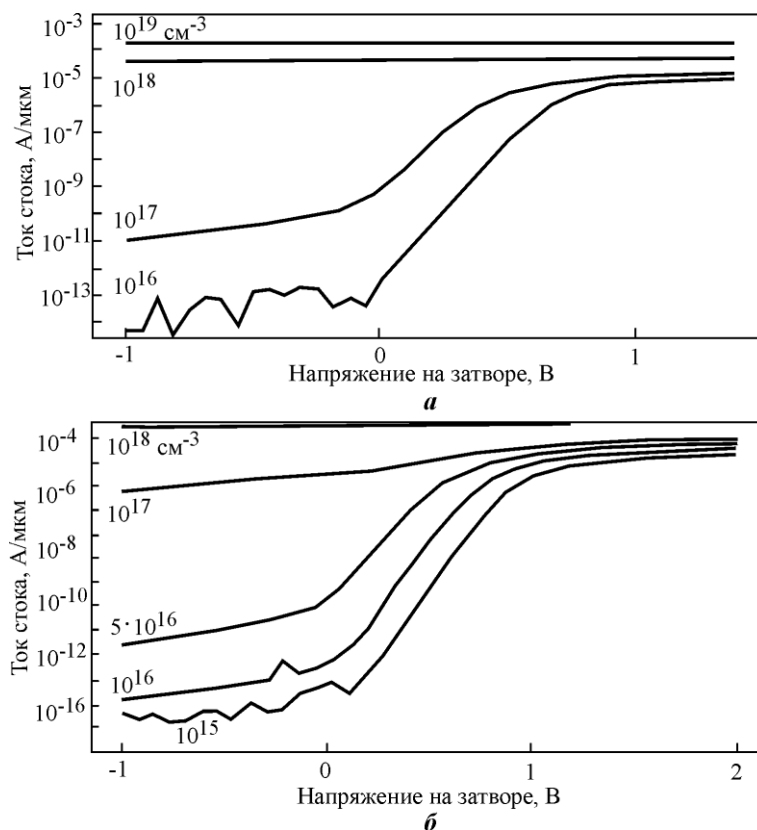


Рис. 4. Проходная ВАХ планарного КНИ МОП БПТ с разной концентрацией примеси в пленке при напряжении на стоке 0,1 В (а) и 1,2 В (б)

Fig.4. Transfer CVC of the SOI MOS JLT with different impurity concentrations in the film. $V_d = 0,1 \text{ V}$ (a) и $V_d = 1,2 \text{ V}$ (b)

С учетом всех заданных ранее параметров рассчитываются структурная модель и характеристики транзистора при разных концентрациях примеси в пленке. Для определения порогового напряжения в качестве начального условия на сток подается напряжение 0,1 В, напряжение на затворе меняется от -1 до 2 В. Полученные передаточные характеристики транзистора представлены на рис.4,а. Из данной передаточной характеристики можно определить зависимость порогового напряжения от концентрации примеси в пленке (рис.5). Видно, что пороговое напряжение находится в диапазоне 0,4–0,5 В (заданная величина) при концентрации примеси в пленке от $5,5 \cdot 10^{16}$ до $7,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.



Рис.5. Зависимость порогового напряжения КНИ МОП БПТ от концентрации примеси в пленке
Fig.5. The dependence of the threshold voltage SOI MOSFET JLT the impurity concentration in the film

Для определения влияния концентрации примеси в пленке на подпороговые токи и токи насыщения моделируется работа беспереходного транзистора с напряжением на стоке 1,2 В, что характерно для технологии 90 нм. Расчетная передаточная ВАХ КНИ МОП БПТ представлена на рис.4,б. Из графиков следует, что при концентрации примеси в пленке менее 10^{17} см^{-3} резко снижаются подпороговые токи, что свидетельствует об отсутствии эффекта межзонного туннелирования. Данная концентрация примеси определяет допустимый максимум легирования пленки.

Зависимость подпорогового тока от концентрации примеси в пленке кремния (рис.6,а) определяется из передаточной ВАХ КНИ МОП БПТ (см. рис.4). При уменьшении концентрации примеси подпороговые токи снижаются. Отметим, что при концентрации примеси в пленке менее $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ подпороговые токи в КНИ МОП БПТ становятся существенно ниже, чем у обычного инверсионного МОП-транзистора. Однако при изменении концентрации примеси в пленке меняются и токи насыщения прибора. В частности, они могут сильно снизиться, что ухудшит быстродействие транзистора. Влияние концентрации примеси в пленке на ток насыщения определяется по графику, представленному на рис.6,б. Из рисунка следует, что ток насыщения сильно возрастает при концентрации примеси в пленке более 10^{18} см^{-3} . Именно на этом участке возникает эффект межзонного туннелирования, когда не обеспечивается режим низких подпороговых токов. При более низких концентрациях примеси в пленке изменения тока насыщения незначительны.

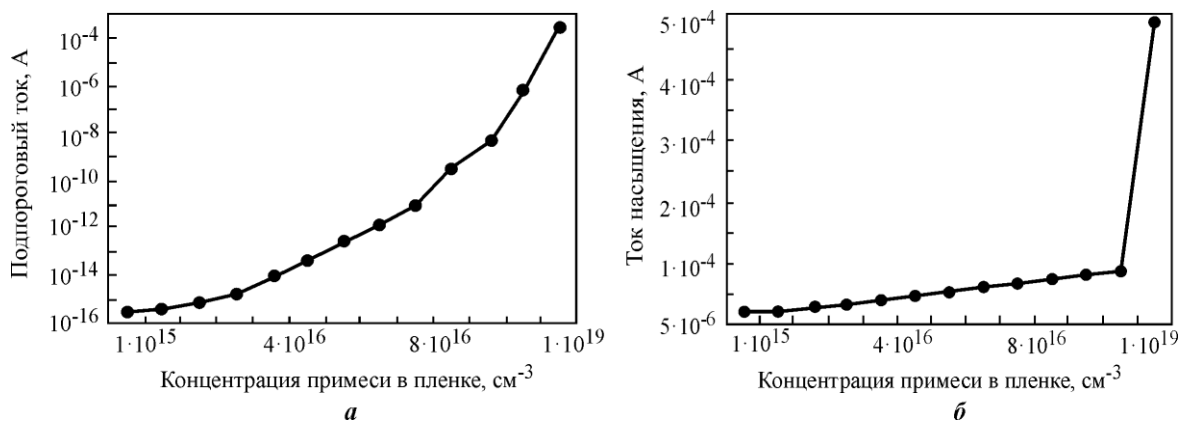


Рис.6. Зависимости подпороговых токов (а) и тока насыщения (б) КНИ МОП БПТ от концентрации примеси в пленке

Fig.6. Dependence of the subthreshold currents (a) and the saturation current (b) of SOI MOS JLT on the impurity concentration in the film

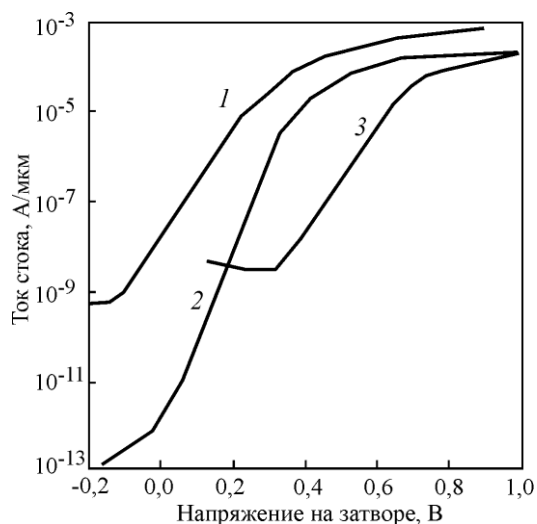


Рис.7. Передаточные ВАХ инверсионного МОП-транзистора (кривая 1), разработанного КНИ МОП БПТ (кривая 2) и нанопроволочного МОП БПТ (кривая 3)

Fig.7. Transient CVC of the nanowire MOS inversion MOSFET (curve 1), SOI MOS JLT (curve 2) and JLT (curve 3)

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод, что при концентрации примеси в пленке $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ пороговое напряжение, равное 0,48 В, находится в заданном для технологии 90 нм диапазоне (0,4–0,5 В). При этом подпороговый ток равен $2,5 \cdot 10^{-13} \text{ А/мкм}$, что значительно ниже подпорогового тока в инверсионном МОП-транзисторе и нанопроволочном МОП БПТ при сопоставимом с этими приборами токе насыщения (рис.7).

Закключение. Исследования разработанной структурной модели планарного КНИ МОП БПТ по нормам технологии 90 нм показали следующее. При концентрациях примеси в рабочем канале прибора менее 10^{17} см^{-3} , когда отсутствует эффект межзонного туннелирования и не возникает эффект паразитного биполярного транзистора, подпороговые токи снижаются до 10^{-13} А/мкм , что существенно ниже, чем у традиционных МОП-транзисторов, при сохранении токов насыщения на приемлемом уровне.

жуются до 10^{-13} А/мкм , что существенно ниже, чем у традиционных МОП-транзисторов, при сохранении токов насыщения на приемлемом уровне.

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. Kumar M.J., Sahay S. Controlling BTBT induced parasitic BJT action in junctionless FETs using a hybrid channel // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2016. – Vol. 63. – No. 8. – P. 3350–3353.
7. 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 20.09.2017 г.; принята к публикации 16.01.2018 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@rambler.ru

Ключников Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории приборно-технологического моделирования АО «НИИ молекулярной электрон-

ники» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, 1-й Западный пр-д, 12/1), 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. Lee C., Afzalian A., 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.*, 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*, 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.*, 2014, vol. 13, no. 2, pp. 208–215.
6. Jagadesh Kumar M., Sahay S. Controlling BTBT induced parasitic BJT action in junctionless FETs using a hybrid channel. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, vol. 63, no. 8, pp. 3350–3353.
7. Korolev M.A., Krupkina T.Yu., CHaplygin Yu.A. Priborno-tehnologicheskoe modelirovanie pri razrabotke izdelij mikroelektroniki i mikrosistemnoj tekhniki [Instrument and technological modeling at development of products of microelectronics and microsystem equipment]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2005, no. 4-5, pp.64–71. (In Russian).

Submitted 20.09.2017; accepted 16.01.2018.

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

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

Efimova Darya I. – master, researcher assistant of the of Integral Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin, sq. 1), ef_dasha@mail.ru