

Сравнительный анализ двухзатворных беспереходного и традиционного МОП-транзисторов средствами TCAD

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

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», a_kras@rambler.ru

Аннотация — Проведен сравнительный анализ электрических характеристик двухзатворных беспереходного и традиционного МОП-транзистора с проектными нормами 90 нм. Отмечены недостатки беспереходного транзистора, обусловленные высоким уровнем легирования его канала. С использованием средств TCAD показано, что при умеренном уровне легирования канала беспереходного транзистора прибор имеет существенно меньшие токи утечки и подпороговый наклон по сравнению с обычным двухзатворным инверсионным МОП-транзистором при сопоставимых значениях порогового напряжения и тока насыщения.

Ключевые слова — двухзатворный беспереходной МОП-транзистор, моделирование, TCAD, электрические характеристики.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время математическое моделирование широко используется при разработке изделий микроэлектроники и процессов их производства. Наибольшую популярность у разработчиков полупроводниковых приборов для этих целей приобрел пакет программ Sentaurus TCAD, учитывающий достаточно сложные физические процессы, происходящие при функционировании современных транзисторов [1-2]. Поэтому именно система Sentaurus TCAD была использована для сравнительного анализа двух новых полупроводниковых приборов - перспективных элементов интегральных схем с высокой степенью интеграции: вертикальные (3D) со структурой типа FinFET двухзатворные беспереходной МОП транзистор (БПТ) и МОП – транзистор с инверсионным каналом (ИКТ). Трехмерное изображение FinFET приведено на рис.1.

Беспереходной МОП-транзистор впервые был описан в работе [3] и стал популярен у разработчиков полупроводниковых приборов вследствие простоты конструкции (по существу он представляет собой управляемый полем пленочный кремниевый резистор) и простоты технологического процесса его изготовления [4-6]. К тому же из-за отсутствия р-п-переходов он не подвержен короткоканальным эффектам, возникающим из-за проникновения ОПЗ стокового перехода в область канала. Первые приборы этого типа имели высокую концентрацию примеси в кремнии (10^{19} см⁻³), что было вызвано необходимостью

обеспечить достаточную проводимость объемного канала, который представлял собой нанопроволоку. Однако при такой концентрации примеси в закрытом состоянии транзистора возникало межзонное туннелирование, приводящее к резкому увеличению подпороговых токов.

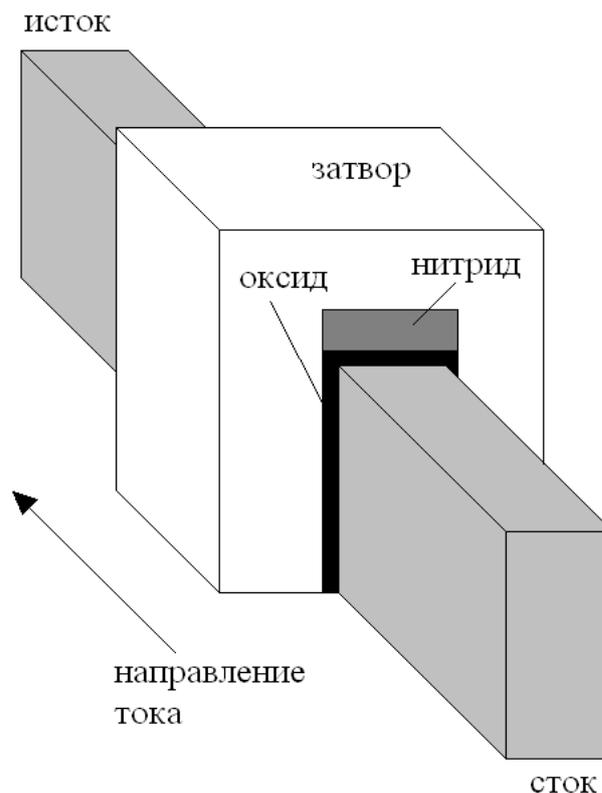


Рис. 1. Двухзатворный МОП – транзистор

В работе [7] было предложено решение этой проблемы путем перехода на планарную КНИ - структуру с нормами технологии 90 нм и снижения уровня легирования пленки кремния до $6 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Таким образом удалось снизить подпороговые токи до 10^{-13} А/мкм при токе насыщения, сопоставимым по величине с токами традиционных МОП-транзисторов. Недостатком планарной конструкции БПТ является большая площадь и поэтому в работе [8] описана структура вертикального двухзатворного БПТ, имеющего малую площадь. К тому же наличие двух затворов, расположенных на противоположных стенках тела прибора, позволило увеличить

концентрацию примеси в кремнии, что повысило проводимость объёмного канала.

Что касается двухзатворного вертикального МОП–транзистора с инверсионным каналом - ИКТ, то этот прибор хорошо известен [9] и широко используется при создании СБИС с наноразмерными технологическими нормами.

Поэтому представляет несомненный научный и технический интерес сравнительный анализ электрических характеристик этих двухзатворных транзисторов.

II. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ БПТ И ИКТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ TCAD

При расчете было принято, что приборы имеют следующие параметры (соответствующие технологическому процессу с проектными нормами 90 нм):

- толщина подложки $N_{Si}=70\text{нм}$;
- толщина подзатворного оксида $D_{ок}=2.1\text{-}5\text{ нм}$;
- длина затвора $L=90\text{нм}$;
- тип затвора: для ИКТ – $n+-Si^*$, для БПТ – $p+-Si^*$;
- длина спейсера $L_{сп}=25\text{нм}$;
- концентрация примеси в $n+$ -стоке $N=10^{20}\text{ см}^{-3}$;
- концентрация примеси в n -LDD-области ИКТ $N_{ldd}=5\cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$.

Двухмерные модели исследуемых транзисторов, созданные средствами Sentaurus TCAD, показаны на рис. 2.

Расчет проходных ВАХ при низком и высоком напряжении сток-исток $V_{си} = 0.1\text{ В}$ и 1.2 В , соответственно, проводился с использованием пакета Sentaurus TCAD. В расчете использованы следующие модели:

- гидродинамическая модель для электронов;
- модель квантования энергии носителей в канале (DensityGradient);
- модель межзонной генерации (Band2Band).

Определялись следующие электрические параметры каждого транзистора:

- пороговое напряжение при $V_{си} = 0.1\text{ В}$ и 1.2 В , определяемое при $I_c=0.1\text{мкА/мкм}$;
- ток насыщения I_n при $V_{си}=1.2\text{В}$;
- ток учетки $I_{ут}$ при $V_{зи}=0$, $V_{си}=1.2\text{ В}$;
- подпороговый наклон SS .

На рис. 3 показаны расчетные проходные ВАХ транзисторов с инверсным каналом и беспереходного транзистора при концентрациях примеси в канале, обеспечивающих значение порогового напряжения $V_{пор}(V_{си}=1.2\text{ В})\approx 0.45\text{ В}$.

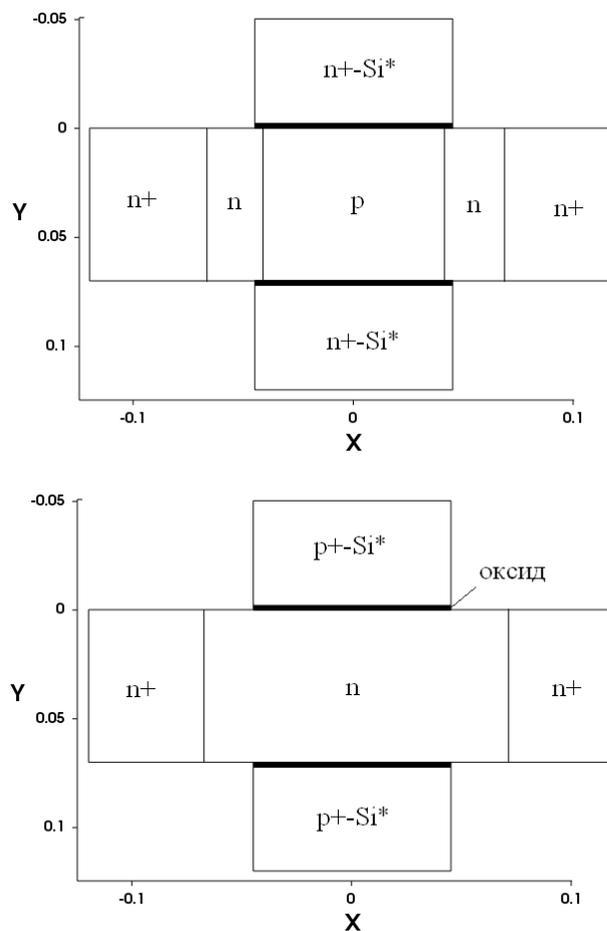


Рис. 2. Двухмерные модели исследуемых транзисторов (ИКТ-вверху, БПТ-внизу)

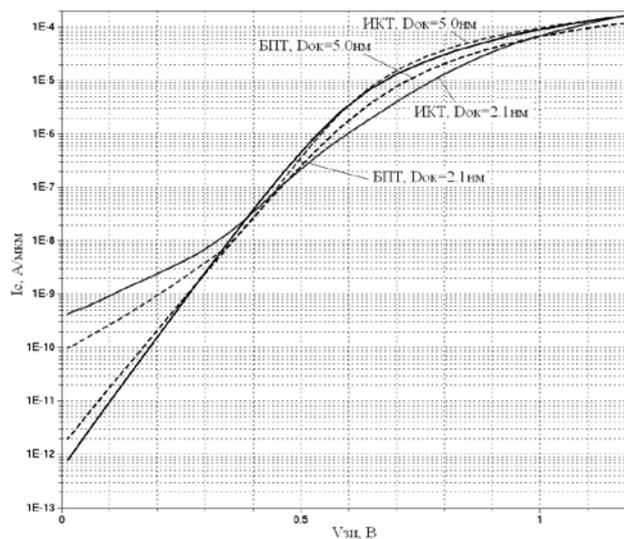


Рис. 3. Проходные ВАХ транзисторов при $V_{си}=1.2\text{ В}$ в логарифмическом масштабе при разных Док

На основе обработки проходных ВАХ были построены сравнительные зависимости основных параметров приборов.

На рис. 4 показаны зависимости порогового напряжения от концентрации примеси в канале (N_k). Как видно из приводимых графиков пороговое напряжение БПТ более плавно зависит от уровня легирования кремния в своём диапазоне концентраций примеси, чем в случае инверсионного транзистора. Для создания МОП БПТ с заданным по технологии 90 нм пороговым напряжением (0.45 В) необходимо легировать тело прибора до уровня порядка 10^{17} см^{-3} .

На рис. 5-6 показаны зависимости тока насыщения и тока утечки от N_k . Анализ графиков позволяет сделать вывод, что хотя ток насыщения БПТ меньше, чем у инверсионного МОП-транзистора, однако уровень 310 мкА/мкм при концентрации примеси в кремнии 10^{17} см^{-3} близок к нормативу для технологии 90 нм. Подпороговый ток при выбранной концентрации примеси в кремнии (10^{17} см^{-3}) у БПТ имеет значение $5 \cdot 10^{-13} \text{ А/мкм}$, что на пять порядков ниже, чем у инверсионного транзистора.

На рис. 7 приведены зависимости величины подпорогового наклона от концентрации примеси в канале при $\text{Dок}=2.1 \text{ нм}$. Видно, что подпороговый наклон у БПТ имеет низкую величину 75 мВ/дек, что в три раза меньше, чем у инверсионного прибора, и практически не зависит от концентрации примеси в кремнии.

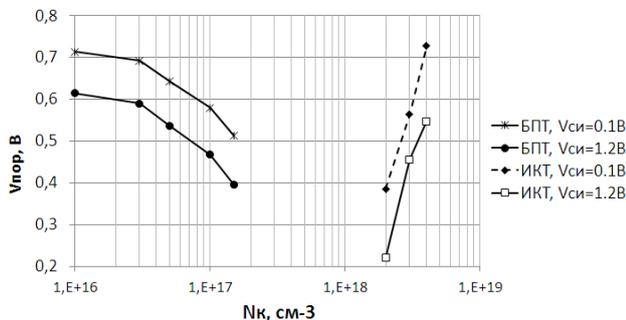


Рис. 4. Расчетные зависимости порогового напряжения от концентрации примеси в канале для $V_{\text{си}}=0.1 \text{ В}$ и 1.2 В

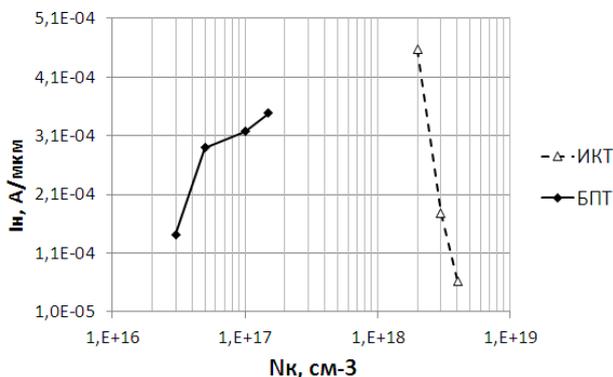


Рис. 5. Расчетные зависимости тока насыщения от концентрации примеси в канале

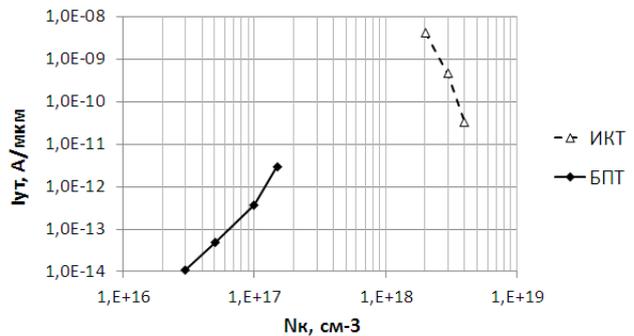


Рис. 6. Расчетные зависимости тока утечки от концентрации примеси в канале

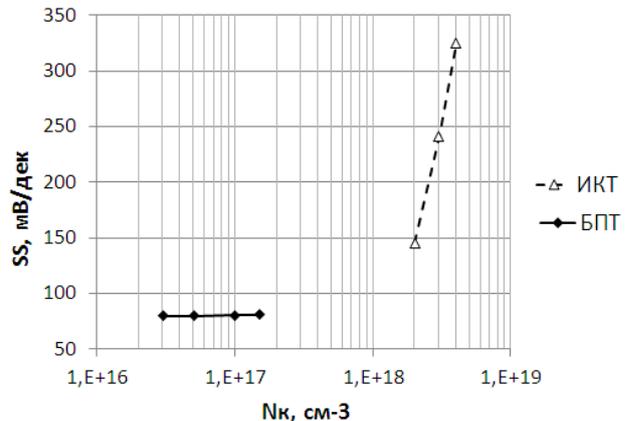


Рис. 7. Расчетные зависимости величины подпорогового наклона от концентрации примеси в канале

В качестве ориентира для сравнения характеристик транзисторов выберем значение порогового напряжения при высоком напряжении сток-исток $V_{\text{пор}}=0.45 \text{ В}$. Определим из рис. 4-7 значения концентрации примеси в канале (требуемой для достижения заданного порогового напряжения), разность пороговых напряжений при низком и высоком напряжениях сток-исток $dV_{\text{пор}}$ а также: I_n , $I_{\text{ут}}$, SS .

Результаты оценки показаны на рис.8-12.

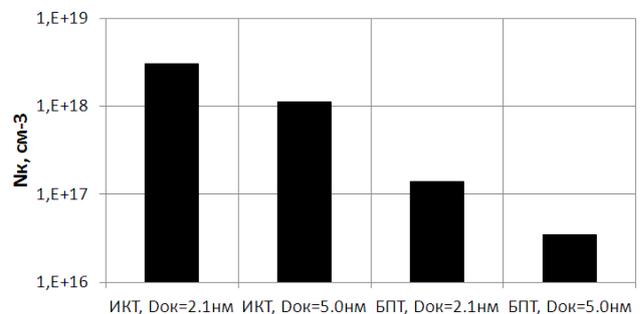


Рис. 8. Концентрация примеси в канале при которой $V_{\text{пор}}=0.45 \text{ В}$

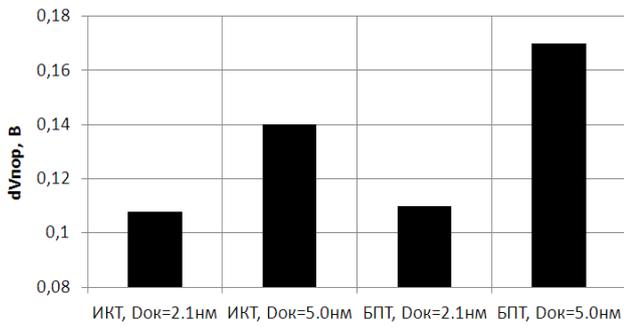


Рис. 9. Расчетное изменение пороговых напряжений относительно $V_{th0}=0.45\text{В}$

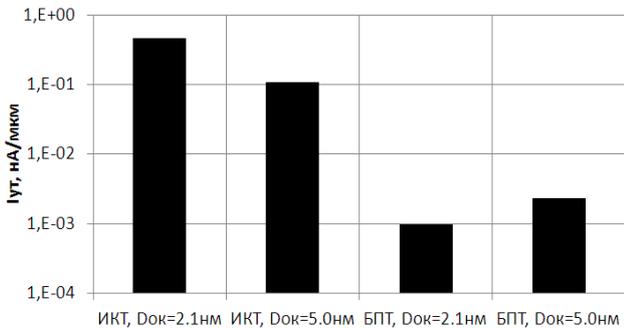


Рис. 10. Ток утечки транзисторов при $V_{th0}=0.45\text{В}$

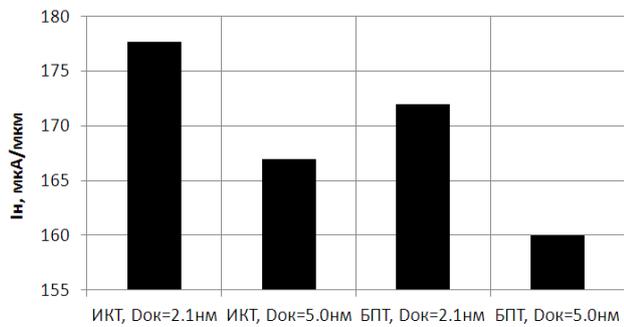


Рис. 11. Ток насыщения транзисторов при $V_{th0}=0.45\text{В}$

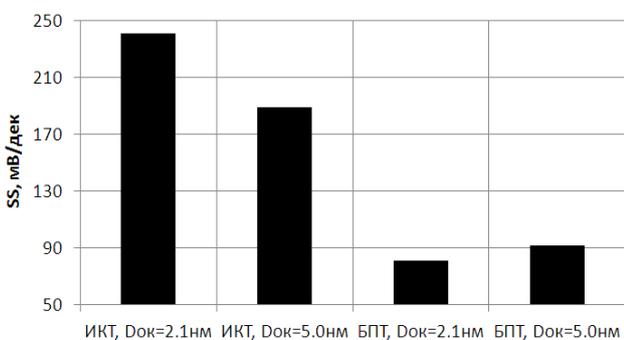


Рис. 12. Подпороговый наклон ВАХ транзисторов при $V_{th0}=0.45\text{В}$

Результаты расчетов (рис. 8-12) позволяют сделать следующие выводы:

- концентрация примеси в канале беспереходного транзистора (при $V_{пор}(V_{си}=1.2\text{В})=0.45\text{В}$) существенно меньше, чем у транзистора с инверсионным каналом;
- при толщине подзатворного оксида $D_{ок}=2.1\text{нм}$ исследуемые транзисторы имеют сопоставимые величины изменения порогового напряжения относительно $V_{th0}=0.45\text{В}$;
- беспереходной МОП-транзистор имеет существенно меньшие токи утечки, чем транзистор с инверсионным каналом;
- транзистор с инверсионным каналом имеет больший ток насыщения, чем транзистор с инверсионным каналом;
- беспереходной МОП-транзистор имеет меньшую величину подпорогового наклона, чем транзистор с инверсионным каналом, причем подпороговый наклон беспереходного транзистора слабо зависит от концентрации примеси в канале и толщины подзатворного оксида, по крайней мере, в диапазоне $D_{ок}=2.1-5\text{нм}$.

На рис. 13-14 показаны распределения концентрации электронов в одномерном сечении середины канала (от затвора к затвору) БПТ и ИКТ при высоком напряжении $V_{си}=1.2\text{В}$ и разных напряжениях $V_{зи}$.

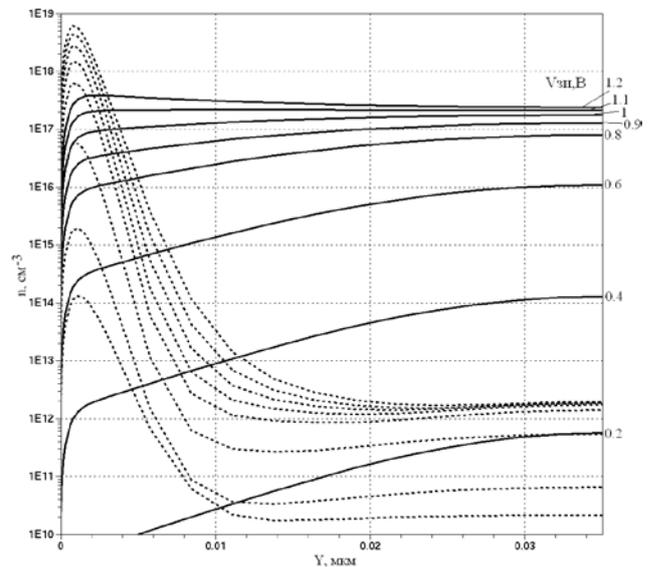


Рис. 13. Распределения концентрации электронов в канале БПТ (сплошные линии) и ИКТ (пунктир) при $V_{си}=1.2\text{В}$ и разных $V_{зи}$

Из рис.13 можно сделать следующие выводы:

- в закрытом состоянии (при $V_{зи}=0.2\text{В}$ и $V_{си}=1.2\text{В}$) канал беспереходного транзистора полностью обеднен электронами по всей своей толщине вследствие влияния контактной разницы потенциалов МОП-структур затворов, образующей смыкающиеся ОПЗ. Транзистор с инверсионным каналом в закрытом состоянии имеет незначительные максимумы

концентрации электронов вблизи границы Si-SiO₂, вероятней всего индуцированные положительным зарядом в подзатворном диэлектрике;

- в открытом состоянии (при $V_{зи}=V_{си}=1.2$ В) канал беспереходного транзистора является проводящим по всей своей толщине (ОПЗ отсутствуют), в то время как транзистор с инверсионным каналом имеет максимумы концентрации электронов только вблизи границы Si-SiO₂ (инверсионные каналы). При этом максимальное значение концентрации электронов в канале транзистора с инверсионным каналом существенно больше, чем в объемном канале беспереходного транзистора.

Проведена оценка плотности заряда (Q_n) электронов в канале транзисторов путем интегрирования зависимостей $n(y)$ из рис. 13 по толщине канала (от затвора к затвору). Полученные зависимости $Q_n(V_{зи})$ показаны на рис. 14, из которого видно, что двухзатворный БПТ имеет сопоставимые значения заряда электронов в канале в сравнении с инверсионным транзистором, несмотря на большую величину максимальной концентрации электронов в двухзатворном приборе.

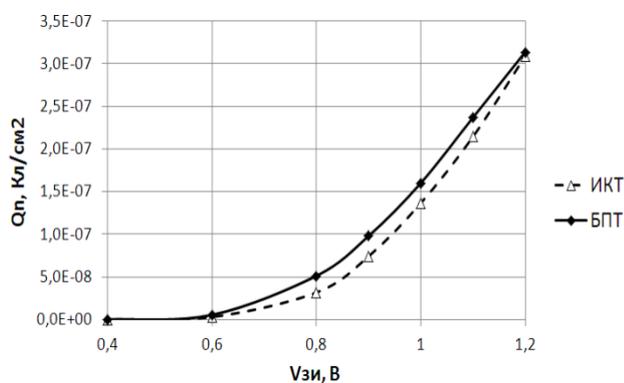


Рис. 14. Расчетные зависимости плотности заряда электронов в канале исследуемых транзисторов от напряжения $V_{зи}$ при $V_{си}=1.2$ В

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Беспереходной МОП-транзистор обладает рядом преимуществ по сравнению с обычным инверсионным МОП-транзистором. Так как в БПТ нет p-n-переходов, соответственно отсутствуют ОПЗ, приводящие в инверсионном МОП-транзисторе к возникновению короткоканальных эффектов, ограничивающих возможность уменьшения размеров прибора. По существу такой транзистор представляет собой управляемый полевым эффектом кремниевый пленочный резистор. Достоинством прибора является и простота его конструкции, что существенно упрощает технологический процесс изготовления транзистора и снижает его стоимость. Вместе с тем высокий уровень легирования (10^{19} см⁻³) канала наноразмерного беспереходного транзистора является

причиной повышенного подпорогового тока прибора из-за межзонного туннелирования носителей.

С использованием средств TCAD проведен сравнительный анализ параметров инверсионного и беспереходного двухзатворных МОП-транзисторов. Показано, что при уменьшенном уровне легирования канала БПТ (10^{17} см⁻³), при котором отсутствует эффект межзонного туннелирования, и с использованием проектных нормам 90 нм, ток насыщения БПТ меньше, чем у инверсионного МОП-транзистора, однако уровень 310 мкА/мкм близок к нормативу для технологии 90 нм. Подпороговый ток при выбранной концентрации примеси в кремнии у БПТ имеет значение $5 \cdot 10^{-13}$ А/мкм, что на пять порядков ниже, чем у инверсионного транзистора. Беспереходной МОП-транзистор имеет в три раза меньшую величину подпорогового наклона (75 мВ/дек), чем транзистор с инверсионным каналом, причем подпороговый наклон БПТ слабо зависит от концентрации примеси в канале и толщины подзатворного оксида.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Y.-C. Wu, Yi-R. Jhan, 3D TCAD Simulation for CMOS Nanoelectronic Devices, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 337 p. 2018.
- [2] Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А. Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2005 – №4-5 – С.64-71.
- [3] J. P. Colinge, C. W. Lee, A. Afzalian, N. D. Akhavan, R. Yan, I. Ferain, P. Razavi, B. O’neill, A. Blake, M. White, A.M. Kelleher, B. McCarthy, and R. Murphy, “Nanowire transistors without junctions,” Nature Nanotechnology, Vol.5, No.3, pp.13-15, 2010.
- [4] C. W. Lee, A. Borne, I. Ferain, A. Afzalian, R. Yan, N. D. Akhavan, P.Razavi, and J. P. Colinge, “High-Temperature Performance of Silicon Junctionless MOSFETs,” IEEE Tran. Electron Devices, vol. 57, no. 5, pp. 620-625, 2010.
- [5] R. Rios, A. Cappellani, M. Armstrong, A. Budrevich, K. Nagashio, H. Gomez and R. Pai «Comparison conventional trigate and transistors junctionless with Lg down to 26 nm», IEEE Electron Device Lett., vol. 32, no. 9, pp. 1170–1172, Sep. 2011, DOI: 10.1109/LED.2011.2158978.
- [6] D. Zhao, T. Nishimura, C. Lee, K. Nagashio, K. Kita, and A. Toriumi, «Oxide metal semiconductor Ge junctionless p-channel field-effect fabricated transistors on ultrathin substrate Ge-on-insulator », Appl. Phys. Exp., vol. 4, no. 3, pp. 031302–031304, 2011.
- [7] М.А. Королев, Ю.А. Чаплыгин, А.С. Ключников, Д.И. Ефимова, “Планарный КНИ беспереходной МОП-транзистор”, Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 1(169) 2018 С.5 -13.
- [8] Ю.А. Чаплыгин, Т.Ю. Крупкина, М.А. Королев, А.Ю., Красюков, Е.А. Артамонова Двухзатворный беспереходной МОП-транзистор. Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 2(170) 2018 (в печати)
- [9] V. Ivengar, A. Kottantharavil, F. Tranjan, M. Jurczak, K. Meyer, “Extraction of the Top and Sidewall Mobility in FinFETs and the Impact of Fin-Patterning Processes and Gate Dielectrics on Mobility”, IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 54, no.5, pp.1177-1184, 2007.

Comparison of Double-Gate Junctionless and Traditional MOSFETs by Means of TCAD

Yu. A. Chaplygin, T. Yu. Krupkina, M. A. Korolev, A. Yu. Krasukov, E. A. Artamonova

National Research University of Electronic Technology, a_kras@rambler.ru

Abstract — Paper represents the results of TCAD [1-2] comparison of the electrical characteristics of 90 nm double-gate JAM and IM MOSFETs, in particular saturation currents, subthreshold currents, subthreshold slopes, threshold voltages.

The junctionless accumulation-mode (JAM) transistor has been recently proposed as an alternative to conventional inversion-mode (IM) MOSFET due to the simplified processing and higher mobility. JAM construction includes highly doped channel region, which is the same type as the source/drain (S/D) regions. Due to the absence of p-n-junctions, it is not subject to short-channel effects [3-8].

2D models of 90 nm double-gate JAM and IM MOSFETs have been created and evaluated by means of Sentaurus TCAD.

Devices have the following parameters: substrate thickness 70 nm, gate oxide thickness 2.1-5 nm, channel length 90 nm, n+ gate for IM MOSFET and p+ gate for JAM MOSFET, spacers length 25 nm, source-drain concentration 10^{20} cm⁻³, n-LDD concentration $5 \cdot 10^{18}$ cm⁻³.

The study of electron concentration distribution in the transistor's channel obtained by TCAD shows that in off-state (at $V_{gs} = 0.2$ V and $V_{ds} = 1.2$ V) the channel of JAM MOSFET is completely depleted by electrons throughout its thickness due to the influence of the contact potential difference of the MOS gate structures forming the interlocking space-charge regions.

In on-state (at $V_{gs} = V_{ds} = 1.2$ V) the channel of JAM MOSFET is conductive over its entire thickness (there are no space-charge region) while IM MOSFET has electron concentration maximum only near the Si-SiO₂ interface (inversion channels). At the same time, estimations show that the transistors have comparable values of electron charge density in the channel.

The dependences of threshold voltages, saturation currents, leakage currents and subthreshold slopes from the channel doping have been calculated.

Additionally, the comparison of channel doping concentrations, threshold voltage variations (DIBL-effect parameters), leakage currents, saturation currents and subthreshold slopes of IM and JAM MOSFETs at gate oxide thicknesses 2.1 nm and 5 nm is presented.

A comparison of the electrical characteristics of 90 nm IM MOSFET and 90 nm JAM MOSFET with reduced channel doping 10^{17} cm⁻³ shows:

- a channel doping concentration of JAM MOSFET at 0.45 V threshold voltage and 1.2 V drain-source is much less than for IM MOSFET;

- when gate oxide thickness is 2.1 nm, the studied transistors have comparable values of the threshold voltage variations;

- JAM MOSFET 310 μ A/ μ m saturation current is smaller than thus for IM MOSFET, however it is enough for standard 90 nm technology;

- subthreshold current of JAM MOSFET is 5-10-13 A/ μ m what is five orders lower than IM MOSFET shows;

- subthreshold slope of JAM MOSFET is 75 mV/dec what is three orders lower than in IM MOSFET and it weakly depends on the channel doping and gate oxide thickness in the required range 2.1-5 nm.

Keywords — double-gate junctionless MOSFET, simulation, TCAD, electrical characteristics.

REFERENCES

- [1] Y.-C. Wu, Yi-R. Jhan, 3D TCAD Simulation for CMOS Nanoelectronic Devices, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 337 p. 2018.
- [2] Korolev M.A., Krupkina T.Yu., Chaplygin Yu.A. Pribornotekhnologicheskoye modelirovaniye pri razrabotke izdeliy mikroelektroniki i mikrosistemnoy tekhniki // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika, 2005. №4-5. S.64-71.
- [3] J. P. Colinge, C. W. Lee, A. Afzalian, N. D. Akhavan, R. Yan, I. Ferain, P. Razavi, B. O'Neill, A. Blake, M. White, A.M. Kelleher, B. McCarthy, and R. Murphy, "Nanowire transistors without junctions," Nature Nanotechnology, Vol.5, No.3, pp.13-15, 2010.
- [4] C. W. Lee, A. Borne, I. Ferain, A. Afzalian, R. Yan, N. D. Akhavan, P. Razavi, and J. P. Colinge, "High-Temperature Performance of Silicon Junctionless MOSFETs," IEEE Tran. Electron Devices, vol. 57, no. 5, pp. 620-625, 2010.
- [5] R. Rios, A. Cappellani, M. Armstrong, A. Budrevich, K. Nagashio, H. Gomez and R. Pai «Comparison conventional trigate and transistors junctionless with Lg down to 26 nm», IEEE Electron Device Lett., vol. 32, no. 9, pp. 1170-1172, Sep. 2011, DOI: 10.1109/LED.2011.2158978.
- [6] D. Zhao, T. Nishimura, C. Lee, K. Nagashio, K. Kita, and A. Toriumi, «Oxide metal semiconductor Ge junctionless p-channel field-effect fabricated transistors on ultrathin substrate Ge-on-insulator », Appl. Phys. Exp., vol. 4, no. 3, pp. 031302-031304, 2011.
- [7] M.A. Korolev, Yu.A. Chaplygin, A.S. Kluchnikov, D.I. Efimova. Planarnyy KNI besperekhodnoy MOP-tranzistor. Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika. 1(169), 2018. S.5-13.
- [8] Yu.A. Chaplygin, T.Yu. Krupkina, M.A. Korolev, A.Yu. Krasukov, E.A. Artamonova. Dvukhzatvornyy besperekhodnoy MOP-tranzistor. Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika. 2(170), 2018 (v pechati).
- [9] V. Ivengar, A. Kottantharavil, F. Tranjan, M. Jurczak, K. Meyer, "Extraction of the Top and Sidewall Mobility in FinFETs and the Impact of Fin-Patterning Processes and Gate Dielectrics on Mobility", IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 54, no.5, pp.1177-1184, 2007.