

# Влияние зернистости металлического затвора кремниевых конических GAA нанотранзисторов на флуктуации порогового напряжения

Н.В. Масальский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия, volkov@niisi.ras

**Аннотация.** Обсуждается влияние зернистости металлического затвора на флуктуацию порогового напряжения кремниевого полевого GAA нанотранзистора. На основе теоремы Пельгорма разработана методика достоверной оценки флуктуации порогового напряжения. В диапазоне длин затворов транзисторов от 11 до 25 нм и средних размеров зерен от 3 до 10 нм получены коэффициенты Пельгорма. Относительные погрешности между модельными значениями стандартного отклонения порогового напряжения и данными полученными из 3D моделирования практически в 95% случаев ниже 5%.

**Ключевые слова:** перечисление ключевых слов через запятую

## 1. Введение

Степень влияния различных технологических источников флуктуации на электро-физические характеристики транзистора возрастает по мере применения новых технологических норм и поэтому, получение достоверной оценки этого действия является актуальной задачей [1-3]. Одним из таких факторов флуктуации является зернистость металлического затвора (ЗМЗ) транзистора [2-5]. Прямые исследования флуктуации требуют моделирования большого количества различных конфигураций транзистора, чтобы иметь большую статистическую выборку. Прогноз на основе теоремы Пельгорма позволяет оценить влияния различных факторов на флуктуацию порогового напряжения ( $\sigma U_{Th}$ ) транзистора любой архитектуры [6]. Этот метод используется для оценки влияния механизма ЗМЗ на флуктуации порогового напряжения кремниевых конических GAA (gate-all-around) нанотранзисторов. Следует уточнить, в коническом транзисторе только рабочая область (канал) имеет форму конуса. При этом, что важно, с стороны истока диаметр больше чем со стороны стока [7]. Выбор такой конструкции обусловлен рядом полезных свойств: всеобъемлющее влияние на дрейф носителей, суперспособность подавлять коротко-канальные эффекты (ККЭ), нивелировать эффекты, связанные с горячими носителями и при определенном (оптимальном) отношении диаметров получать ток стока выше на 15-25% по сравнению с цилиндрической GAA конструкцией. Мы перечислили только главные отличительные свойства конической архитектуры, при этом она сохраняет плюсовые характеристики свойственные всем цилиндрическим

GAA нанотранзисторам. Ключевой параметр любого полевого транзистора, и рассматривающий конический не исключение, пороговое напряжение. Исходя из современных технологических норм в настоящей работе в диапазоне длин затворов транзисторов ( $L_g$ ) от 11 до 25 нм и размеров зерен ( $G_s$ ) от 3 до 10 нм и получены коэффициенты Пельгорма, которые позволяют сделать достоверные оценки параметра  $\sigma U_{Th}$  «на коленке».

## 2. Постановка задачи исследования

Для точного анализа влияния ЗМЗ на характеристики конических GAA нанотранзисторов необходимо [5]:

- i) использовать 3D моделирование,
- ii) моделировать большие ансамбли различных модификаций транзисторов.

Эти два фактора заметно увеличивают вычислительные затраты. Поэтому мы используем подход на основе теоремы Пельгорма. Этот метод эффективен в плане экономии вычислительных ресурсов [4], поскольку, рассчитав коэффициент Пельгорма, можно прогнозировать диапазон параметра  $\sigma U_{Th}$  для различных длин и диаметров затвора GAA транзистора. Следует отметить, что есть и другие методы, позволяющие сократить время вычислений, которые основаны на машинном обучении [8, 9] или карта чувствительности к флуктуациям [10, 11].

Классический закон Пельгорма был сформулирован для планарных транзисторных структур [12], который утверждает, что стандартное отклонение порогового напряжения ( $\sigma U_{Th}$ ) обратно пропорционально эффективной площади

металлического затвора [4]. Этот закон может быть распространен на современные архитектуры, включая кремниевые конические GAA нанотранзисторы, который в данном случае можно представить в виде [2]:

$$\sigma U_{Th} = \frac{A_{Th}}{\sqrt{L_g W_{eff}}} , \quad (1)$$

где ATh - коэффициент Пельгорма, Weff - эффективный периметра затвора.

В координатах  $\sigma U_{Th}$  и зависимость  $\sigma U_{Th}$  ( ) предоставляет собой прямую линию (в декартовой системе координат в первом квадранте) наклон которой есть коэффициент Пельгорма. Однако, размерность коэффициента ATh – mV nm – является несистемной, т.е. в некотором роде этот коэффициент лишен физического смысла. Это создает предпосылку для более детального исследования структуры (компонентов) ATh. Следует отметить, что сама линия не достигает начала координат, однако ее продолжение должно проходить через него. Эти свойства делают подход Пельгорма простым и надежным инструментом для оценки влияния флюктуации  $\sigma U_{Th}$  [4], в частности, из-за механизма ЗМЗ. Все исследуемые в рамках нашей работы модификации транзисторов включают широко используемый нитрид-титановый металлический затвор из-за его совместимости с оксидом кремния и низкой емкости [13]. Механизм ЗМЗ проявляется из-за случайной ориентации металлических зерен, которые образуются в процессе формирования металлического затвора [13, 14]. Поэтому, средний размер зерна  $G_s$  определяется характеристиками технологических операций, например, время осаждения, температура и длительность отжига. Опираясь на многочисленные работы других исследователей [3, 5, 14, 15] интересующие нас электро-физические характеристики металлических зерен затвора были установлены так: i) две возможные ориентации металлических зерен с работой выхода  $\phi_M$  4.4 и 4.6 эВ, ii) вероятность их появления 40 и 60%, iii) профили ЗМЗ генерируются с использованием диаграмм Poisson-Voronoi в зависимости от значения параметра  $G_s$ . На рис. 1 показана схема металлического затвора GAA нанотранзистора, на котором изучается влияние механизма ЗМЗ.

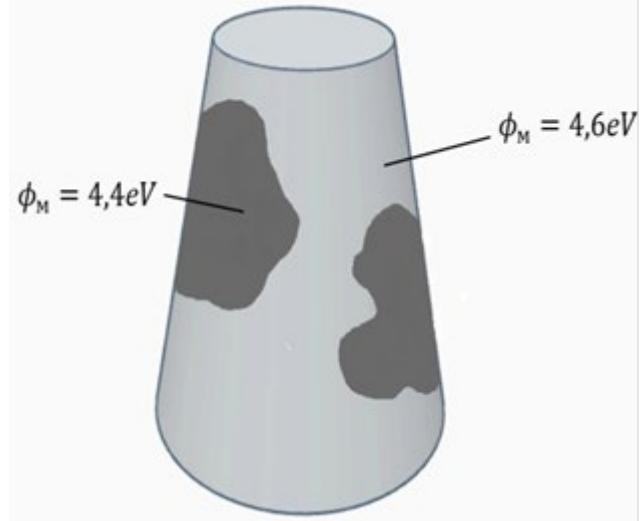


Рис. 1. Схема металлического затвора конического GAA с зернистостью металла

### 3. Модель ЗМЗ, расчеты и обсуждение

Аналогично предыдущей работе [16] для получения оценки полагаем, что механизм ЗМЗ является единственным источником флюктуации  $\sigma U_{Th}$ . Поскольку теорема Пельгорма применима для описания флюктуации порогового напряжения из-за разных механизмов [12], то в предположении о линейности зависимости коэффициента Пельгорма от  $G_s$ , что также было экспериментально продемонстрировано, следовательно его можно представить таким выражением:

$$A_{Th} = \gamma_G G_s , \quad (2)$$

где  $\gamma_G$  - коэффициент пропорциональности, размерность которого В, и он также может быть подгоночным параметром. При этом коэффициент  $\gamma_G$  не зависит от управляющих напряжений на транзисторе [12]. Однако он будет зависеть от металла, используемого в процессе формирования затвора [17]. Очевидно, что его величина  $\gamma_G$  будет постоянной для исследуемой транзисторной структуры. Для других архитектур коэффициент будет принимать другие значения. Тогда окончательное выражение для модели Пельгорма ЗМЗ кремневого конического GAA нанотранзистора сводится к простому выражению:

$$\sigma U_{Th} = \gamma_G G_s / \sqrt{S_{eff}} , \quad (3)$$

Тогда отношение  $\gamma_G / \sqrt{S_{eff}}$  определяет чувствительность отдельной транзисторной структуры к флюктуации ЗМЗ.

На рис. 2 показаны результаты расчетов по

модели Пельгрома для зависимости  $\sigma_{UTh}((S_{eff})^{1/2})$  для различных значений  $G_s$ :

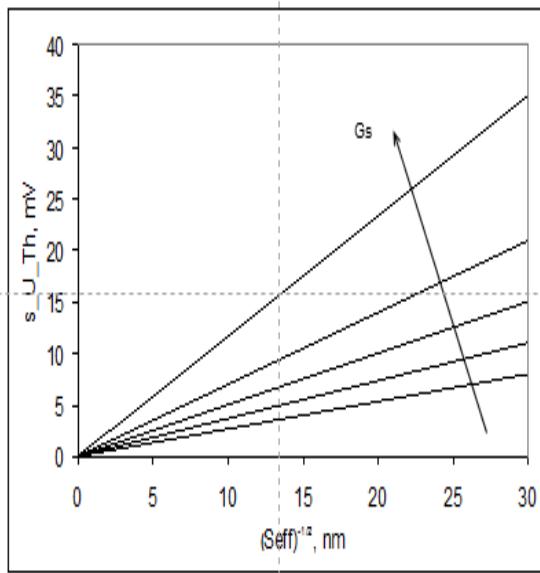


Рис. 2. Зависимость  $\sigma_{UTh}((S_{eff})^{1/2})$  при  $G_s = (3; 4; 5; 8; 10)$  нм.

В данном случае в соответствии с классическими представлениями более тонкие структуры более чувствительны к проявлению механизма МЗМ [4, 5]. Значение параметра  $\sigma_{UTh}$  линейно увеличивается с ростом  $G_s$  и пропорционально уменьшается с ростом  $\sqrt{S_{eff}}$ . Следовательно, в пределе  $\sqrt{S_{eff}} \rightarrow \infty$  (для практических случаев при очень больших топологических размерах рабочей области) затвор будет вести себя как затвор с постоянным значением работы выхода  $\phi_M$  и параметр  $\sigma_{UTh}$  будет стремиться к нулю ( $\sigma_{UTh} \rightarrow 0$ ). Наклон каждой зависимости  $\sigma_{UTh}((S_{eff})^{1/2})$  определяет коэффициент Пельгрома  $A_{Th}$ . Эта зависимость  $A_{Th}(G_s)$  графически отражена на рис. 3 ниже.

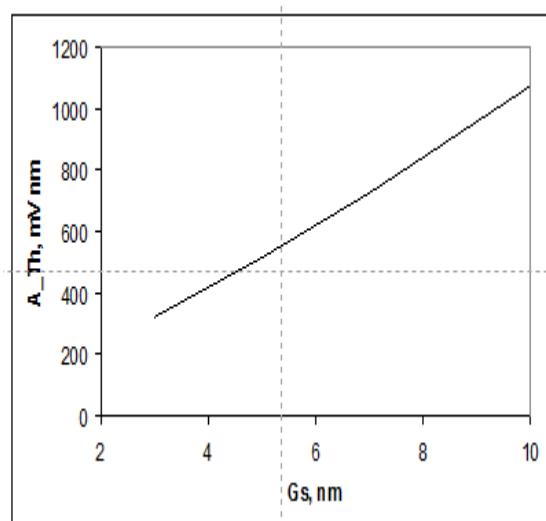


Рис. 3. Зависимость  $A_{Th}(G_s)$

Наклон этой характеристики и есть значение параметра  $\gamma_G$ . В нашем случае коэффициент он равен 0.105 В. Такая точность необходима, для минимизации расхождения между прогноз и данными 3D моделирование параметра  $\sigma_{UTh}$ . На рис. 4 приведены результаты 3D моделирования, полученные с использованием мульти метода 3D моделирования электро-физических характеристик кремниевых полевых с полностью охватывающим затвором нанотранзисторов [18].

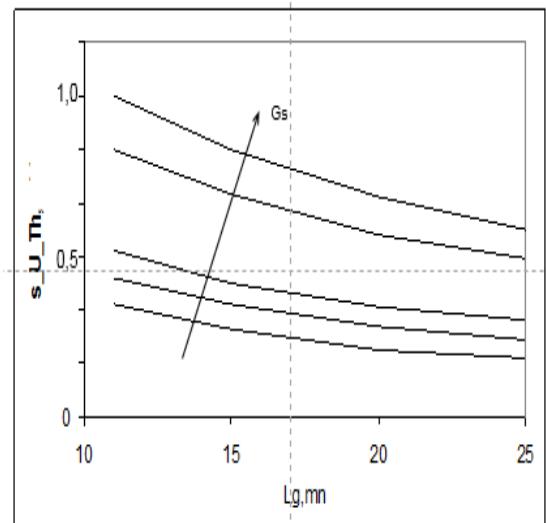


Рис. 4. Зависимость  $\sigma_{UTh}(L_g)$  при  $G_s = (3; 4; 5; 8; 10)$  нм, экстрагированная из результатов 3D моделирования

В исследуемом диапазоне топологических параметров транзисторов и размеров зерен в большинстве случаев подтверждается линейность зависимости  $\sigma_{UTh}((S_{eff})^{1/2})$ . При этом очевидно, что чем больше площадь затвора, тем меньше влияние металлических зерен. И, соответственно, наклон графиков  $\sigma_{UTh}((S_{eff})^{1/2})$  для

разных значений  $G_s$  практические совпадают с коэффициентами Пельгroma и линейно увеличивается с увеличением  $G_s$ . Большие отклонения от линейности наблюдаются с чрезмерным ростом параметра  $\sigma_{UTh}$  в ультра тонких прототипах (с малыми значениями  $D_{min}/D_{max}$  и  $L_g$ ) и большими зернами. Этот эффект возникает из-за того, что на затворе имеется всего несколько металлических зерен (например, для  $L_g=11$  нм и  $G_s=10$  нм их всего 4!) [19]. Поэтому, нормальное распределение порогового напряжения превращается в бимодальное с пиками вокруг экстремальных значений параметра  $\phi_M$  (4,4/4,6 эВ) [12]. Это и обуславливает отклонение от линейности зависимости  $\sigma_{UTh}(S_{eff})^{1/2}$ . Однако, можно выделить такой диапазон в отдельный случай, и откорректировать коэффициенты Пельгroma. Следует отметить, что более 95% рассматриваемого диапазона более или менее подчиняются линейному закону. Отклонение составляет менее 5%. Поэтому, полученные данные можно использовать для достоверного прогноза флюктуации порогового напряжения и связанными с ним других электро-физических характеристик транзистора.

Для среднего значения зернистости  $G_s=5$  нм представлен сравнительный анализ значений параметра  $\sigma_{UTh}$  полученные из модели основанной на теореме Пельгрома и 3D моделирования. На рис. 5 приведена зависимость  $\sigma_{UTh}(S_{eff})$  для прототипов в диапазоне длин  $L_g$  от 11 до 25 нм.

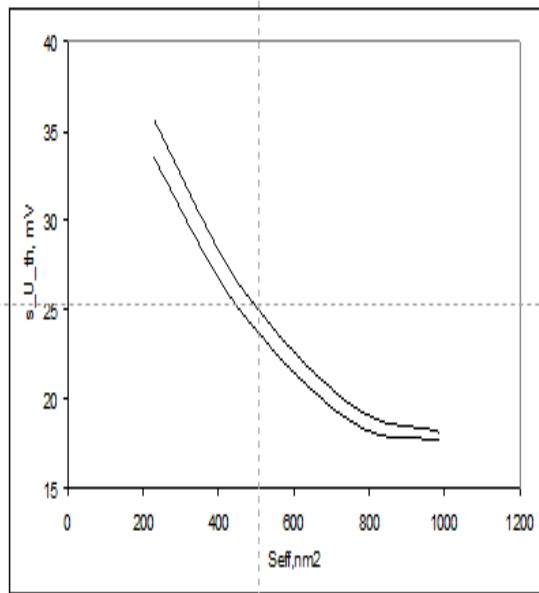


Рис. 5. Зависимость  $\sigma_{UTh}(S_{eff})$ , где верхняя - данные по Пельгорму, нижняя - по 3D моделированию.

Представленные данные говорят об прекрасном качественном и хорошем количественном совпадении. На рис. 6 и 7 приведены значения

рассогласования параметра  $\sigma_{UTh}$  вычисленных разными способами и относительная погрешность между ними.

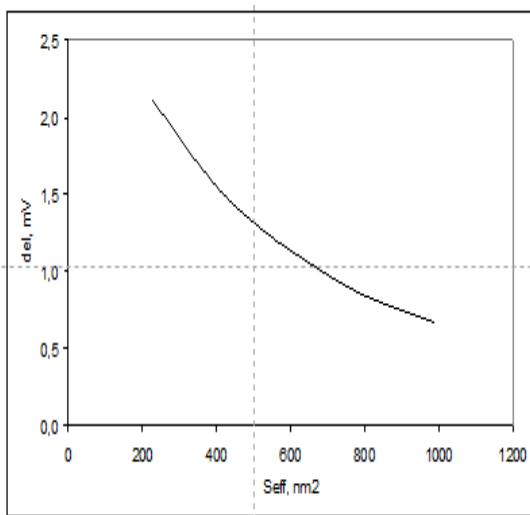


Рис. 6. Зависимость  $\Delta(S_{eff})$

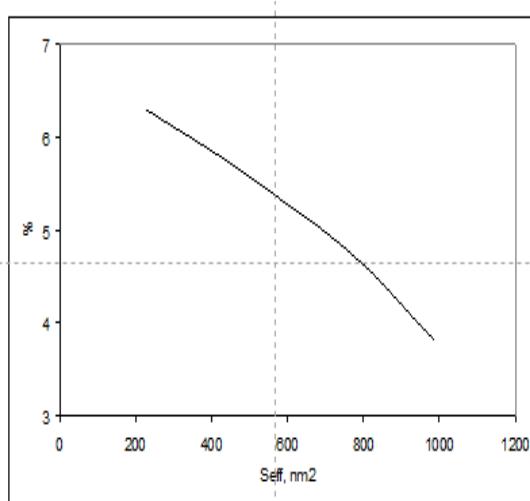


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности (%) от  $S_{eff}$

Что и ожидалось, снижение длины затвора (и соответствующее уменьшение диаметров (процедура необходимая для подавления ККЭ)) приводит к росту погрешности. Чтобы избежать в дальнейшем дополнительного роста ошибок, например при расчете номиналов токов транзисторов, следует разбить весь диапазон топологических параметров на поддиапазоны и для них определить коэффициенты Пельгрома. При этом, важно подчеркнуть, для конкретной архитектуры транзистора с одинаковым металлическим затвором параметр  $\gamma_G$  не изменяется и определяется один раз! В упрощённом варианте для двух прототипов с топологическими параметрами соответствующие краям интересую-

щего диапазона моделируется флюктуация порогового напряжения из-за механизма ЗМЗ. Результаты моделирования для прототипов с длиной  $L_g$  11 и 25 нм приведены ниже на рис. 8.

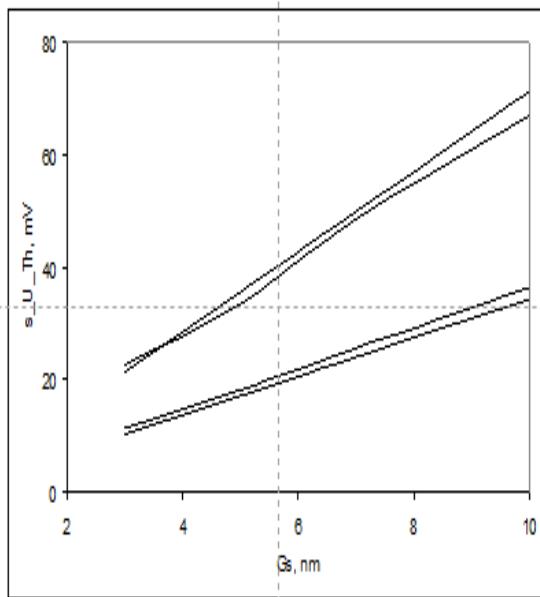


Рис. 8. Зависимость  $\sigma_{U\text{Th}}(L_g)$  при  $L_g = 11$  нм (нижняя кривая в верхней группе) и 25 нм (нижняя кривая в нижней группе), верхние кривые в каждой группе аналогичные зависимости полученные при помощи (2) и (3)

Из 3D моделирования можно экстрагировать все

## The Influence of the Drain Size of the Metal Gate of Silicon Conical GAA Nanotransistors on the Fluctuations of the Threshold Voltage

N. Masalsky

**Abstract.** The influence of the grain size of a metal gate on the fluctuation of the threshold voltage of a silicon field GAA nanotransistor is discussed. Based on Pelgor's theorem, a method of reliable estimation of threshold voltage fluctuations has been developed. Pelgorm coefficients were obtained in the range of transistor gate lengths from 11 to 25 nm and average grain sizes from 3 to 10 nm. The relative errors between the model values of the standard deviation of the threshold voltage and the data obtained from 3D modeling are in almost 95% of cases below 5%.

**Keywords:** silicon all-around gate (GAA) nanotransistor, grain size of the metal gate, Pelgora coefficient, threshold voltage fluctuation, simulation

## Литература

1. More Moore. International Roadmap for Devices and Systems. IRDS, Piscataway, NJ, USA, 2021
2. S. Yu, S. M. Won, H. W. Baac, D. Son, C. Shin. Quantitative evaluation of line-edge roughness in various FinFET structures: Bayesian neural network with automatic model selection. “IEEE Access”, vol. 10 (2022), 26340–26346
3. M. A. Elmessary. Scaling/LER study of Si GAA nanowire FET using 3D finite element Monte Carlo simulations. “Solid-State Electron”, vol. 128, (2017), 17–24.
4. K. Nayak, S. Agarwal, M. Bajaj, P. J. Oldiges, K. V. R. M. Murali, V. R. Rao. Metal-gate granularity-

значения параметров модели Пельгорма. И получить, что уже отмечалось, достоверную оценку флюктуации порогового напряжения.

## 4. Заключение

В диапазоне длин затворов транзисторов от 11 до 25 нм и ЗМЗ от 3 до 10 нм получены коэффициенты Пельгорма. Относительные погрешности между модельными значениями  $\sigma_{U\text{Th}}$  данными полученными из 3D моделирования практически в 95% случаев ниже 5%.

Показано, что прототипы одинаковой архитектуры и с одним и тем же металлическим затвором, но имеющие разные топологические параметры, в частности размеры рабочей области, характеризуются одним и тем же значением параметра  $\gamma_G$ .

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН «Проведение фундаментальных научных исследований (47 ГП)» по теме № FNEF-2022-0022 "Математическое обеспечение и инstrumentальные средства для моделирования, проектирования и разработки элементов сложных технических систем, программных комплексов и телекоммуникационных сетей в различных проблемно-ориентированных областях".

- induced threshold voltage variability and mismatch in Si gate-all-around nanowire n-MOSFETs. “IEEE Trans. Electron Devices”, vol. 61, (2014), no. 11, 3892–3895.
5. W.-L. Sung, Y.-S. Yang, Y. Li. Work-function fluctuation of gate-all-around silicon nanowire n-MOSFETs: A unified comparison between cuboid and Voronoi methods. “IEEE J. Electron Devices Soc.”, (2021), vol. 9, 151–159.
6. J. A. Croon, W. Sansen, H.E. Maes. Matching properties of deep sub-micron MOS transistors, Springer, 2005.
7. N.V. Masalskii. Simulation of silicon FETs with a fully enclosed gate with a high-k gate dielectric. “Russian Microelectronics”. (2023), V. 52, 228-232.
8. C. Akbar, Y. Li, W. L. Sung. Machine learning aided device simulation of work function fluctuation for multichannel gate-all-around silicon nanosheet MOSFETs. “IEEE Trans. Electron Devices”, (2021), vol. 68, no. 11, 5490–5497.
9. J. Lim, C. Shin. Machine learning (ML)-based model to characterize the line edge roughness (LER)-induced random variation in FinFET. “IEEE Access”, (2020), vol. 8, 158237–158242.
10. G. Indalecio, N. Seoane, K. Kalna, A. J. García-Loureiro. Fluctuation sensitivity map: A novel technique to characterise and predict device behaviour under metal grain work-function variability effects. “IEEE Trans. Electron Devices”, (2017), vol. 64, no. 4, 1695–1701.
11. H. Carrillo-Nuñez, N. Dimitrova, A. Asenov, V. Georgiev. Machine learning approach for predicting the effect of statistical variability in Si junctionless nanowire transistors. “IEEE Electron Device Lett.”, (2019), vol. 40, no. 9, 1366–1369.
12. M.J. Pelgrom. Matching properties of MOS transistors. “IEEE J. of solid-state circuits”, V. 24, (1989), 1433-1439.
13. S. A. Vitale, J. Kedzierski, P. Healey, P. W. Wyatt, C. L. Keast. Work-function-tuned TiN metal gate FDSOI transistors for subthreshold operation. “IEEE Trans. Electron Devices”, (2011), vol. 58, no. 2, 419–426.
14. K. Takeuchi, M.-S. Ibaraki, A. Nishida. Random fluctuations in scaled MOS devices. International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices SISPAD’09, SISPAD 2009, 79-85.
15. D. Nagy, G. Espiñeira, G. Indalecio, A. J. García-Loureiro, K. Kalna, N. Seoane. Benchmarking of FinFET, nanosheet, and nanowire FET architectures for future technology nodes. “IEEE Access”, (2020), vol. 8, 53196–53202.
16. Н.В. Масальский. Чувствительность распределения потенциала конических ГАА нанотранзисторов к вариациям топологических размеров рабочей области, “Труды НИИСИ РАН”, 2023, Т. 13(3), 23-29.
17. J.P Colinge. FinFETs and Other Multi-Gate Transistor. NewYork: Springer-Verlag, 2008.
16. Н. В. Масальский. Проблемы моделирования 3D затворных полевых нанотранзисторов архитектура с полностью охватывающим затвором.”Нанотехнологии”. (2019), Т. 11, № 3, 14-24
19. J.S. Yoon, T. Rim, J. Kim, K. Kim, C.K. Baek, Y.H. Jeong. Statistical variability study of random dopant fluctuation on gate-all-around inversion-mode silicon nanowire field-effect transistors. “Appl. Phys. Lett.”, V. 106, (2015), 1035073.