

Чувствительность распределения потенциала конических GAA нанотранзисторов к вариациям топологических размеров рабочей области

Н. В. Масальский¹

¹ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия, volkov@niisi.ras.ru

Аннотация. Количественно проанализированы источники вариации распределения потенциала в конических all-around gate (GAA) транзисторах с короткой и тонкой рабочей областью. Разработана математическая модель флуктуации распределения потенциала, включающая вариации топологических параметров рабочей области транзистора. Численно исследованы флуктуации характеристической длины. Определены коэффициенты чувствительности. Сформулированы критерии оценки изменения потенциала из-за разброса топологических параметров.

Ключевые слова: кремниевый all-around gate (GAA) нанотранзистор, распределение потенциала, уравнение Пуассона, флуктуация, моделирование

1. Введение

Одним из трендов современного технологического развития является неуклонное повышение значимости управляемости технологий. Любопытен тот факт, что допуск, например, в машиностроении составляет ничтожные доли процента, а в микроэлектронике два десятка. При этом там и там присутствуют технологические отклонения, которые определяются неопределенностью свойств и исходных материалов и их изменением в процессе обработки. Поэтому разброс параметров конечных изделий неизбежен для любых технологий. Разница заключается в проценте брака. В машиностроении по сравнению с микроэлектроникой он ничтожен даже если рассматривать широко апробированные техпроцессы микроэлектроники. Современный скейлинг элементной базы микроэлектроники усиливает вариативность технологических флуктуаций. Это в свою очередь отражается на электрофизических характеристиках элементной базы современной электроники. В конечном итоге микросхемы становятся существенно дороже, поскольку все процесс от проекта до промышленного образца усложняется и растягивается. Следовательно влияние флуктуаций электрофизических характеристик транзисторов может стать основным препятствием для дальнейшего масштабирования. Причина этого заключается в том, что технологические вариации, не масштабируются теми же темпами, что и размеры [3, 4]. Поэтому любые случайные флуктуации размера/формы/состава материала транзистора составляют значительную долю номиналь-

ного значения. Поскольку большинство механизмов разбросов имеет, как правило, случайный характер, возрастает необходимость увеличения допусков при проектировании микросхемы или уменьшение зоны SOA [5]. Таким образом, правильная оценка эффектов разброса для нанометровых технологий играет важную роль в определении того, могут ли быть выполнены требования для разработки будущих поколений микросхем с использованием текущих технологической и инструментальной платформ [3, 4].

Из широкой номенклатуры разбросов применительно к КМОП транзистору выделяют локальный случайный разброс [5]. Случайный компонент локального разброса связан с вариациями на атомном уровне. Ключевой характеристикой локального разброса является то, что вариации на атомном уровне усредняются по площади прибора (для случайных флуктуаций примеси и толщины окисла) или длины/ширины прибора, и поэтому они имеют обратно пропорциональную зависимость от геометрии [6]. Отметим, что источники случайного разброса могут проявляться в форме случайных флуктуаций примеси, шероховатости края линии, флуктуации толщины оксида, флуктуации работы выхода, зернистости поликремния, морфологии high-k диэлектриков с металлическими затворами [3, 7, 8]. Важно подчеркнуть, что случайный разброс не может быть, в отличие от остальных механизмов, уменьшен путем улучшения управления технологическим процессом [9]. При этом невыполнение требований при разра-

ботке влечет к пересмотру конструкции микросхемы [10, 11].

Для абсолютного большинства конструкций кремниевого КМОП транзистора случайный компонент локального разброса связан с флуктуацией значения эффективной длины канала, разбросом порогового напряжения и уровня тока утечки [5, 8, 12, 13]. В общем случае перечисленные параметры косвенно могут оказывать влияние друг на друга. Но для определения влияния на флуктуации электрофизических характеристик транзистора они принимаются статистически независимыми. Такое допущение приемлемо, если анализируется только их локальный разброс [1-3, 5, 8].

Применительно к тонкослойным GAA транзисторам с нанометровой длиной конической рабочей области, схема которого приведена ниже на рис. 1, в отсутствии легирования локальный разброс, связанный с разбросом эффективной длины, проявится на важной характеристике – распределении потенциала.

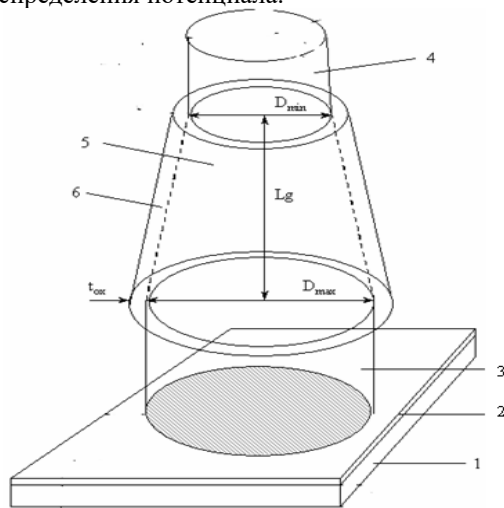


Рис. 1. Схема кремниевого конического GAA нанотранзистора, где 1 – Si подложка, 2 – SiO₂ пленка, 3 – исток, 4 – сток, 5 – коническая рабочая область, 6 – SiO₂ подзатворный оксид

На рис. Приведены следующие обозначения: Lg – приведенная длина затвора, Dmax – максимальный диаметр рабочей области, Dmin – минимальный диаметр рабочей области, tox – толщина подзатворного оксида.

Это распределение определяет ключевые характеристики транзистора: пороговое напряжение, подпороговый ток, крутизну подпороговой характеристики. Поэтому оценка чувствительности распределения потенциала, связанная с неопределенностью и вариацией топологи-

ческих размеров кремниевой нелегированной рабочей области конического КМОП нанотранзистора, является актуальной. Для того, чтобы понять возможности конических нанотранзисторов с нелегированным каналом, отличительной особенностью которых является своеобразная экранировка стока, необходимо в первую очередь исследовать вариации распределения потенциала, обусловленные разбросом объема рабочей области и толщины подзатворного диэлектрика. При рассмотрении механизмов возникновения разбросов, обусловленных топологическими параметрами полупроводниковых и диэлектрических слоев важно также учитывать конструктивные особенности транзисторов, используемые для подавления коротко-канальных эффектов (ККЭ) [14]. В настоящей работе с помощью математической модели 3D распределения потенциала в конической рабочей области численно исследуется его чувствительность к разбросу топологических параметров рабочей области.

2. Модель потенциала

В приближении пространственного разделения заряда распределение потенциала в конической рабочей области, рассматриваемой транзисторной структуры, в предположении, что влияние фиксированных окисных зарядов на ее электростатику пренебрежимо мало, то для моделирования распределения потенциала используется 2D-уравнение Пуассона следующего вида [15]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \phi(r, z)}{\partial z^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_s}, \quad (1)$$

где $\phi(r, z)$ – электростатический потенциал в рабочей области, q – заряд электрона, ϵ_s – диэлектрическая проницаемость кремниевой рабочей области ($\epsilon_s = 11.7$), N_A – концентрация легирования рабочей области, ось z совпадает с осью симметрии (ортогональная подложке) транзисторной структуры, ось r – ортогональна оси z . Для аналитического решения (1) есть несколько способов. В предыдущих работах мы успешно применяли метод где истинное распределение потенциала заменяется многочленом второй степени вдоль оси z (см. рис. 1). Такой подход был предложен Янгом [16], и был апробирован нами для построения аналитических моделей разнообразных конструкций КМОП нанотранзисторов. Аналитическое решение получается при

следующих граничных условиях:

1) электрическое поле на границе затвор-оки-

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{ox}}{R' \ln(1 + t_{ox} / R')} (U'_{gs} - \phi_s(z)) = \\ \text{сел} \quad \quad \quad ; \\ = \varepsilon_s \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial r} \Big|_{r=R'} \end{aligned}$$

2) электрическое поле в центре рабочей обла-

$$\text{сти} \quad \frac{\partial \phi(r, z)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0;$$

3) потенциал на краю рабочей области со стороны истока $\phi(r, 0) = U_{bi}$;

4) потенциал на краю рабочей области со стороны стока $\phi(r, L_g) = U_{bi} + U_{ds}$,

где $\phi(r, z)|_{r=R'} = \phi_{si}(z)$ – поверхностный потенциал, ε_{ox} – диэлектрическая проницаемость подзатворного окисла, $R'(z) = R_{\max} - \frac{\Delta R}{L_g} z$,

$U'_{gs} = U_{gs} - U_{FB}$, U_{gs} – напряжение на затворе, U_{FB} – напряжение плоских зон, U_{bi} – контактная разность потенциалов, U_{ds} – напряжение сток-исток.

Из [15] решение (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \phi(r, z) = \phi_c(z) + \\ + \left[\frac{\varepsilon_{ox}}{2R'\varepsilon_s \ln(1 + t_{ox} / R')} (U'_{gs} - \phi_s(z)) \right] r^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\phi_c(z) = \phi(0, z)$ – центральный потенциал.

Выражая $\phi_c(z)$ через $\phi_s(z)$ аналогично [16] $\phi_c(z) = (1 + C)\phi_s(z) - CU'_{gs}$, где

$$C(z) = \frac{\varepsilon_{ox}}{2\varepsilon_s \ln(1 + t_{ox} / R')} , \text{ приходим к выраже-}$$

нию $\phi(z, r)$, которое зависит только от $\phi_s(z)$. Одним из способов чтобы получить аналитическое выражение, описывающее распределение потенциала в конической рабочей области GAA нанотранзистора, выбран метод, где необходимо аналитически решить уравнение Пуассона относительно $\phi_s(z)$. Оно решается с использованием вышеприведенных граничных условий при помощи аналогичного параболического приближения, о котором вкратце упоминалось выше. Тогда решение 1D уравнение Пуассона

относительно $\phi_s(z)$ можно записать в виде [16]:

$$\begin{aligned} \phi_s(z) = \frac{1}{\sinh(\frac{L_g}{l'})} [\Phi_1 \sinh(\frac{L_g - z}{l'}) + \\ + \Phi_2 \sinh(\frac{z}{l'})] - A \end{aligned} \quad (4)$$

$$A = A_0 - U'_{gs}, \quad \Phi_1 = A_0 + U_{bi} - U'_{gs},$$

$$\Phi_2 = A_0 + U_{bi} + U_{ds} - U'_{gs},$$

$$A_0 = \frac{qN_A}{\varepsilon_s} \left(\frac{1 - C((\frac{R'}{R_{\max}})^2 - 1)}{4C} \right) R'^2 - U'_{gs}$$

$$l' = \frac{R'}{2} \sqrt{2 \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{ox}} \ln(1 + \frac{t_{ox}}{R'}) + 1}$$

3. Результаты моделирования

Для численных исследований выбран следующий прототип КМОП нанотранзистора. Для данной модели длина рабочей области L_g фиксирована и составляет 25 нм. Минимальный и максимальный радиусы рабочей области выбраны 3.5 и 5 нм соответственно. Минимальное отношение $R_{\min}/R_{\max}=0.7$. Исток и сток равномерно легированы примесью с концентрацией $N_{SD} = 0.5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Концентрация легирования рабочей области N_A равна $1.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Толщина поликремневого затвора составляет 20 нм. Толщина подзатворного оксида кремния t_{ox} варьируется в диапазоне 1.2 – 1.8 нм. Работа выхода металлического электрода затвора составляет 4.6 эВ.

Первоначально, в соответствии с вышеизложенным, определим отклонения характеристической длины в результате вариативности радиуса и толщины подзатворного диэлектрика, используя следующее соотношение:

$$\delta l' = \frac{\delta R'}{2} \sqrt{2 \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{ox}} \ln(1 + \frac{\delta t_{ox}}{\delta R'}) + 1}, \quad (5)$$

Тогда среднеквадратичное отклонение во всем диапазоне имеет вид, представленный на рис. 2.

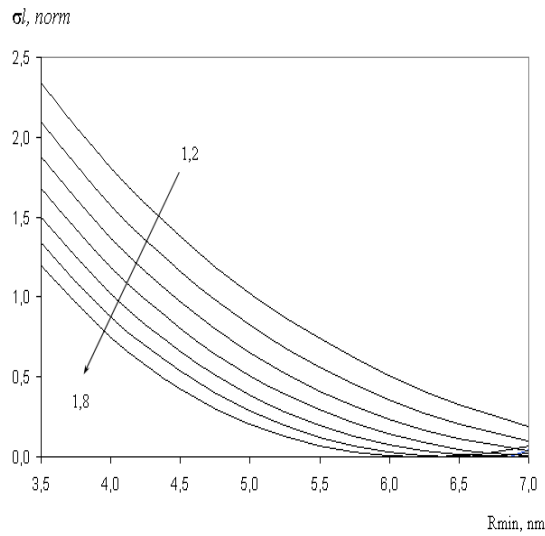


Рис. 2. Зависимость $\sigma l(R_{\min})$ при разных t_{ox} от 1.8 до 1.2 нм

Отметим, что величина флуктуации, что и ожидалось, имеет обратно пропорциональную зависимость от геометрии рабочей области. Учет конструктивных ограничений на диаметр кремниевой и толщины оксидной пленок для подавления ККЭ к ограничению области R_{\min} и t_{ox} : радиус до 5 нм толщина до 1.5 нм [17]. Для этих диапазонов среднеквадратичное отклонение практически линейно убывает с ростом R_{\min} и t_{ox} , что иллюстрируется рис 3 и рис. 4.

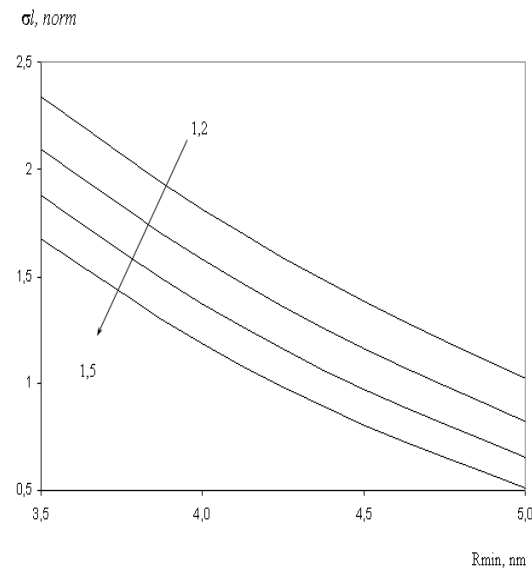


Рис. 3. Зависимость $\sigma l(R_{\min})$ при разных t_{ox} от 1.5 до 1.2 нм

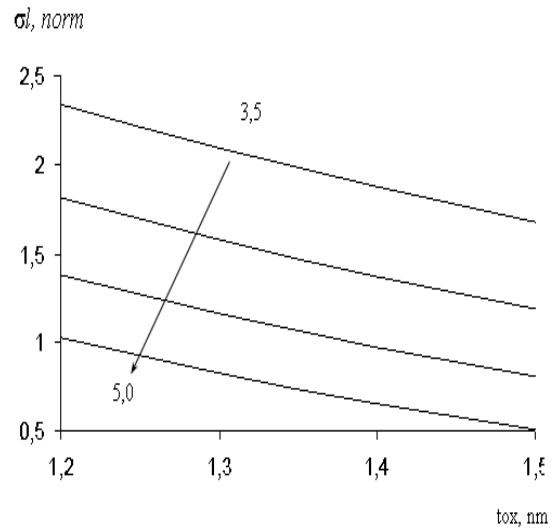


Рис. 4. Зависимость $\sigma l(t_{ox})$ при разных R_{\min} от 3.5 до 5.0 нм

Для количественной оценки можно ввести коэффициенты чувствительности по R_{\min} и t_{ox} :

$$K_R = \frac{\Delta l}{\Delta R_{\min}}, \quad K_{ox} = \frac{\Delta l}{\Delta t_{ox}}, \quad (6)$$

$$\text{где } \Delta l = K_R \Delta R_{\min} + K_{ox} \Delta t_{ox}$$

Такой подход упрощает определение оценки чувствительности распределения потенциала из-за флуктуации топологии рабочей области. В этом случае можно воспользоваться следующим выражением

$$\delta \phi_s = \frac{1}{\sinh(\frac{\delta L_g}{\delta l'})} [\delta \Phi_1 \sinh(\frac{\delta L_g - z}{\delta l'}) + \delta \Phi_2 \sinh(\frac{z}{\delta l'})] - \delta A \quad (7)$$

Отметим, что слагаемое A также зависит от R_{\min} и t_{ox} .

Исходя из соотношений (5) и (7) хорошо видно, что флуктуация потенциала имеет свои особенности. В точках примыкания к истоку и стоку потенциал будет одинаковый для любых значений рассматриваемых топологических параметров [15]. Отличия будут возникать в значениях минимального потенциала и кривизны зависимости $\phi(z)$ в областях близких к границе истока и стока [17]. Отметим, что для электрофизических характеристик транзистора значение кривизны у стока важно, т. к. оно влияет на подвижность носителей в канале. Изменение

кривизны характеристики $\varphi(z)$ у стока иллюстрируется рис ниже.

На рис. 5 приведены распределения поверхностного потенциала вдоль оси z в рабочей области конических GAA транзисторов с $L_g=25$ нм и с разными значениями R_{min} .

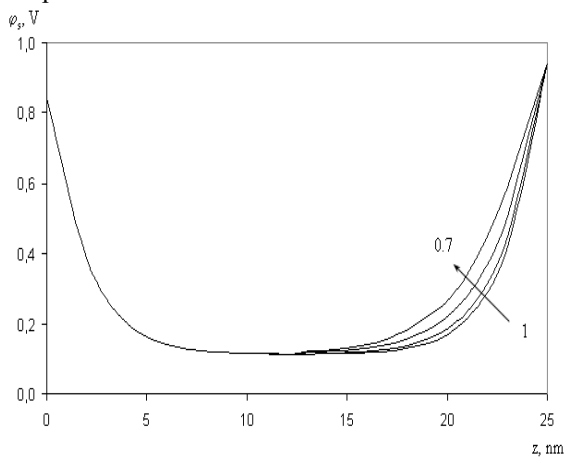


Рис. 5. Профили распределения поверхностного потенциала при $U_{ds}=0.1$ В разными R_{min} от 1 до 0.7 (снизу вверх) с шагом 0.1. (Значение R_{min} нормировано относительно R_{max})

На рис. 6 для точек максимального изменения потенциала приведена рассчитанная зависимость $\sigma\varphi$ от R_{min} при фиксированном значении L_g .

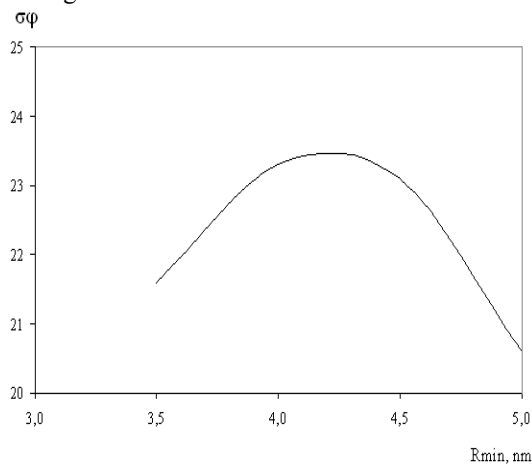


Рис. 6. Зависимость $\sigma\varphi$ от R_{min}

Полученная зависимость не в полной мере отражает общую тенденцию роста $\sigma\varphi$ при изменении объема рабочей области. Отметим, наличие экстремума параметра $\sigma\varphi$ при $R_{min}=4.25$ нм (в наших условиях моделирования). При этом коэффициенты Пелгрона [5] для трех значений R_{min} (3.5, 4.0, 5.0 нм) близки к единице и показывают рост с ростом R_{min} . Эти

два факта указывают на конкурирующее влияние флуктуаций топологических параметров и ККЭ [8, 13]. Этот результат подчеркивает компромиссное соотношение между различными источниками вариаций, что не исключает вероятность их взаимокompенсации. Критерием такой оценки может служить, например, распределение порогового напряжения, преимущественно соответствующее теоретическому нормальному распределению для всех условий работы устройства, что указывает на то, что были получены достаточные значения для анализа его флуктуации.

4. Заключение

Количественно проанализированы источники вариации распределения потенциала в конических GAA транзисторах с короткой и тонкой рабочей областью с длиной 25 нм и изменяющимся радиусом от 3.5 нм до 5 нм. На основе аналитического решения 2D уравнения Пуассона разработана математическая модель флуктуации распределения потенциала, включающая вариации топологических параметров рабочей области транзистора. Численно исследованы флуктуации характеристической длины, которые отвечают общепризнанной тенденции. Определены коэффициенты чувствительности флуктуации характеристической длины. Численно проанализированы флуктуации потенциала и показано, что тенденция роста флуктуаций с увеличением объема рабочей области может нарушаться для очень тонких нанотранзисторных структур. Поскольку зависимость флуктуации потенциала не в полной мере отражает общую тенденцию роста при изменении объема рабочей области (на ней присутствует экстремум), а коэффициенты Пелгрона показывают устойчивый рост, то эти два факта указывают на конкурирующее влияние флуктуаций топологических параметров и ККЭ. Поэтому компромиссное соотношение между различными источниками вариаций не исключает вероятность их взаимокompенсации.

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

Sensitivity of the Potential Distribution of Conical GAA Nanotransistors to Variations in the Topological Dimensions of the Working Area

N. Masalsky

Abstract. The sources of potential distribution variation in conical all-around gate (GAA) transistors with a short and thin working area are quantitatively analyzed. A mathematical model of the fluctuation of the potential distribution has been developed, including variations in the topological parameters of the transistor's working area. Fluctuations of the characteristic length are numerically investigated. The sensitivity coefficients are determined. Criteria for evaluating potential changes due to the spread of topological parameters are formulated. nanostructures with an elliptical cross-section, which distinguishes them from the classical ideas about the thermal conductivity of solids.

Keywords: silicon all-around gate (GAA) nanotransistor, potential distribution, Poisson equation, fluctuation, simulation

Литература

1. Sh. Toriyama, D. Hagishima, K. Matsuzawa, N. Sono. Device simulation of random dopant effects in ultra-small MOSFETs based on advanced physical models. International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices SISPAD'06, SISPAD 2006, 111-114.
2. K. J. Kuhn. Reducing variation in advanced logic technologies: approaches to process and design for manufacturability of nanoscale CMOS. In Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting, 2007, 471-474.
3. K. Kuhn, C. Kenyon, A. Kornfeld, M. Liu, A. Maheshwari, W.K. Shih, S. Sivakumar, G. Taylor, P. VanDerVoorn, K. Zawadzki. Managing process variation in Intel's 45nm CMOS technology. "Intel Technology Journal", V. 12(2), (2008), 93-109.
4. 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.
5. M. J. Pelgrom. Matching properties of MOS transistors. "IEEE J. of solid-state circuits", V. 24, (1989), 1433-1439.
6. J. A. Croon, W. Sansen, H. E. Maes. Matching properties of deep sub-micron MOS transistors, Springer, 2005
7. S. K. Saha. Modeling process variability in scaled CMOS technology. "IEEE Design Test of Computers", V. 27,(2010), 8-16.
8. K. J. Kuhn, M. D. Giles, D. Becher, P. Kolar, A. Kornfeld, R. Kotlyar, S. T. Ma, A. Maheshwari, S. Mudanai. Process technology variation. "IEEE Trans. on Electron Devices", V. 58, (2011), 2197-2208.
9. 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), 103507
10. Г. И. Зебрев. Физические основы кремниевой нанoeлектроники. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011.
11. M. Onobajo, J. Silva-Martinez. Analog circuit design for process variation-resilient systems-on-a-chip. Dordrecht: Springer, 2012.
12. R. Rao, A. Srivastava, D. Blaauw, D. Sylvester D. Statistical estimation of leakage current considering inter-and intra-die process variation. In: Proc. International Symposium on Low Power Electronics and Design, 2003, 84-89.
13. R. Sh. Wang, T. Yu, R. Huang, Y. Y. Wang. Impacts of short-channel effects on the random threshold voltage variation in nanoscale transistors. "Science China Information Sciences", V. 56, (2013), 111-117.
14. M. M. Tehranipoor, U. Guin, D. Forte. Counterfeit integrated circuits: Detection and Avoidance. Springer, 2015.

-
15. J. P Colinge. FinFETs and Other Multi-Gate Transistor. NewYork: Springer-Verlag, 2008.
 16. I. Ferain, C.A. Colinge, J. Colinge Multigate transistors as the future of classical metal–oxide–semiconductor field-effect transistors. “Nature”, V. 479, (2011), 310–316.
 17. Н.В. Масальский. Моделирование ВАХ ультратонких КНИ КМОП нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором, “Микроэлектроника”. Т. 60(6), 2021, 387-393.
 18. Nagy D., Indalecio G., Garcia-Loureiro A.J., Elmessary M.A., Kalna K., Seoane N. FinFET versus gate-all-around nanowire FET: performance, scaling, and variability. “IEEE Journal of the Electron Devices Society”, V. 6, (2018), 332-340.