

# Влияние случайных флуктуаций легирующей примеси на характеристики полевых кремниевых GAA нанотранзисторов

Н.В. Масальский<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Исследованы эффекты случайных флуктуаций легирующей примеси на электро-физические характеристики кремниевых полевых GAA нанотранзисторов с различными радиусами рабочей области. Показано, что транзисторы с меньшим радиусом характеризуются снижением среднего значения и вариации подпорогового наклона и DIBL-эффекта, тем самым повышая устойчивость к проявлению коротко-канальных эффектов. Напротив, относительные вариации тока стока транзистора с уменьшением диаметра возрастают, что связано со снижением проводимости рабочей области при более узких ее поперечных сечениях. Абсолютные флуктуации тока стока существенно зависят от количества примеси, проникающей в рабочую область. Для определения причин флуктуации токов стока кремниевых полевых GAA нанотранзисторов, изучены статистические характеристики последовательного сопротивления истока/стока и низко полевой подвижности. Эти параметры критически одновременно влияют на разброс тока стока транзистора. Для нивелирования влияния механизма диффузии легирующей примеси в рабочую область рекомендуется ограничить уровень легирования областей сток/исток и использовать относительно большие из диапазона возможных поперечные сечения рабочей области. Это позволит обеспечить стабильные электро-физические характеристики транзисторов с высоким парированием коротко-канальных эффектов.

**Ключевые слова:** кремниевый нанотранзистор с полностью охватывающим затвором (GAA), флуктуация легирующей примеси, флуктуация проводимости и подвижности, разброс тока стока

## 1. Введение

Большой статистический разброс электро-физических характеристик из-за случайных флуктуаций примеси (random doping fluctuation (RDF)) является одной из основных проблем в наноразмерных полупроводниковых приборах [1-3]. В данном контексте рассматривают диффузию легирующей примеси высоколегированных областей истока/стока в качестве основного механизма ее инъекции в рабочую область (область канала). Это является наиболее важным, поскольку на фоне низколегированной рабочей области отличие уровней легирования рабочей области и областей стока и истока составляет более четырех порядков. Этот недостаток присущ также кремниевым полевым транзисторам с полностью охватывающим затвором (gate-all-around (GAA)). Эффекты RDF изменяют его электро-физические характеристики, включая пороговое напряжение ( $U_{th}$ ), последовательные сопротивления истока/стока ( $R_{sd}$ ) и проводимость ( $G_m$ ), что связано с эффективной длиной канала и подвижностью носителей.

Необходимость исследования эффектов RDF обусловлена тем, что сложилась тенденция развития наноразмерных полевых транзисторов с

низколегированными областями, которые используются в приложениях с низким энергопотреблением. При этом рабочий ток транзистора (ток  $I_{on}$ ) снижается, но не до критического уровня [4, 5]. Для выполнения условий применимости важно исследовать влияние сочетания механизма RDF и вариативности топологических размеров GAA транзисторов на стабильность его электро-физических характеристик. Это позволяет уяснить причины разброса электро-физических характеристик определенной конструкции транзистора, найти способы для уменьшения вариаций характеристик устройства и сформулировать рекомендации для разработки конструкции устройства с высоким SOA. В настоящей работе мы исследовали совместное влияние эффектов RDF, индуцируемых высоколегированными областями истока/стока и флуктуации радиуса кремниевого GAA нанотранзистора с длиной канала близкой к современной отечественной технологии на вольт-амперные характеристики (BAX), в частности, пороговое напряжение и ток стока, и их производные. В настоящей работе не обсуждается механизм диффузии примеси из высоколегированных областей истока и стока в низколегированную рабочую область. Мы рассматриваем случай фиксирован-

ного количества инжектированной примеси, которая случайным образом распределяется по всему объему рабочей области.

## 2. Конструкция и параметры прототипа

Все прототипы кремниевого полевого GAA нанотранзистора были n-типа, имели одинаковые профили легирования областей сток/исток с пиковым значением  $N_{ds}$  у внешнего края этих областей. Все рабочие области (области канала) легированы бором с фиксированным уровнем концентрации  $N_A$ . Низкий уровень легирования рабочей области отвечает современным технологическим требованиям [1, 5] и позволяет получить достоверную оценку влияния эффектов RDF на вариативность ВАХ кремниевых полевых GAA нанотранзисторов. Прототипы имели фиксированную длину затвора  $L_g$  и толщину подзатворового оксида  $t_{ox}$  – оксида кремния, диапазон диаметра рабочей области (выбран от 7.5 до 12 нм). Геометрическое представление и значения вышеуказанных параметров приведены на рис. 1 и в табл. 1.

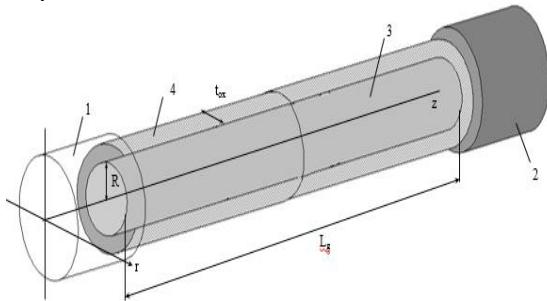


Рис. 1. Схема кремниевого GAA нанотранзистора, где 1 – исток, 2 – сток, 3 - кремниевая рабочая область, 4 - подзатворный окисел

Таблица 1. Параметры прототипа транзистора

Параметр	значение
$L_g$ , нм	22
$t_{ox}$ , нм	1.2
$N_{da}, \text{cm}^{-3}$	$5.0 \times 10^{19}$
$N_A, \text{cm}^{-3}$	$1.0 \times 10^{15}$

## 3. Алгоритм моделирования

Для эффективного исследования вариаций вольт–амперные характеристики (ВАХ) кремни-

евых полевых GAA нанотранзисторов моделируются с использованием самосогласованного решения дрейфа-диффузионного уравнения в сочетании с уравнением Пуассона. Предложенный подход был апробирован при моделировании нескольких типов кремниевых GAA транзисторов и во всех случаях достигалось требуемое согласование с экспериментальными данными [6 и библиография к ней].

Для включения механизма RDF в базовую модель кремниевого полевого GAA нанотранзистора был использован подход изложенный в [7, 8]. Поскольку все прототипы имели низкую концентрацию примеси в рабочей области, рандомизированы были только примеси инжектированные из областей сток/исток в соответствии с кинетическим методом Монте-Карло [9-11]. В нашем случае упрощено рассматриваются дальнодействующие и короткодействующие кулоновские потенциалы. Коэффициент экранировки был выбран  $2N^{1/3}$ , где N – концентрация инжектированной примеси (мышьяка). Размещение отдельных атомов мышьяка в рабочей области в виде точечных потенциалов, что иллюстрируется рис.2, упрощает процесс моделирования дрейфа-диффузионного переноса носителей [12]. При этом адекватность модели не снижается.

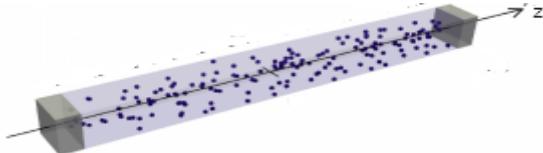


Рис. 2. Схематичное представление рабочей области [12]. Инжектированная примесь изображена точками и распределена случайным образом.

Количество выборок для исследования RDF составляло 100 для каждого значения диаметра рабочей области с шагом 0.5 нм. Линейные токи стока  $I_{ds}$  вычислялись при управляющих напряжениях на стоке  $U_{ds}$  0.05 В и затворе  $U_{gs}$  0.75 В. Максимальные значения электропроводности  $G_{m,max}$  были определены при  $U_{ds}$  0.05 В. Значения порогового напряжения  $U_{th}$  в линейном режиме ( $U_{th,lin}$ ) были извлечены с использованием метода постоянного тока.

Чтобы проанализировать эффекты RDF, мы исследовали характерное поведение следующих параметров – сопротивление стока/истока  $R_{sd}$  и низко-полевая подвижность. Эти параметры имеют электрическую природу, связанную с эффективностью транспорта носителей через транзистор. Следует отметить, что значение параметра  $R_{sd}$  рассчитывается с использованием Y-функции. Уравнения Y-функции для извлечения  $R_{sd}$  в линейном режиме приведено в [13]. В ходе исследований анализируется характеристика –

чувствительность. Чувствительность определяется как наклон диаграмм рассеяния, который представляет собой разброс исследуемого параметра, например, тока стока транзистора, по отношению к флуктуациям параметров подверженных влиянию механизма RDF. Чувствительность показывает, насколько сильно отклонения этих параметров влияют на вариативность тока.

#### 4. Результаты и обсуждение

Из полученных результатов подпороговом режиме можно извлечь важные характеристики - подпороговый наклон (SS) и DIBL-эффект для различных значений радиусов рабочей области. Значения параметра SS извлекаются из ВАХ ниже порогового напряжения  $U_{th}$  при  $U_{ds} = 0.8$  В. В нашем случае значения параметра DIBL вычисляются из соотношения [14]:  $DIBL = -(U_{th,sat} - U_{th,lin}) / (U_{ds,sat} - U_{ds,lin})$ , где  $U_{th,sat}$  - это пороговое напряжение, извлеченное при  $U_{ds} = 0.75$  В,  $U_{ds,sat} = 0.75$  В,  $U_{ds,lin} = 0.05$  В.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы. Снижение уровня побочной примеси в канале кремниевого GAA нанотранзистора является положительным фактором, т.к. это приводит к снижению средних значений параметров SS и DIBL, не смотря на то что с ростом радиуса значения параметров DIBL и SS возрастают. Однако, это увеличение незначительно и составляет менее 10% в исследуемом диапазоне радиусов рабочей области. И хотя значения SS и DIBL достаточно большие, стандартные отклонения параметров SS и DIBL, напротив, по сравнению с ними, невелики, что иллюстрируется рис. 3, несмотря на то, что поведение зависимостей  $\sigma(SS)$  и  $\sigma(DIBL)$  разное.

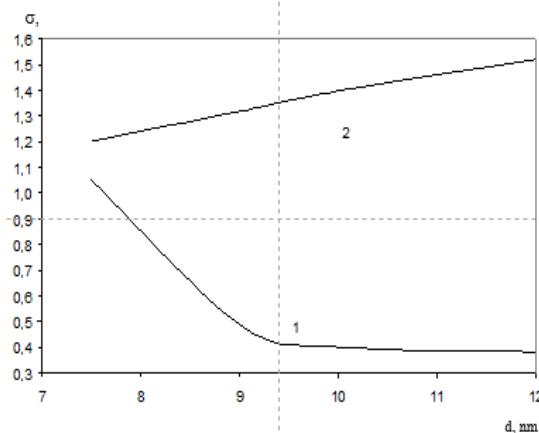


Рис. 3. Зависимость стандартного отклонения SS (кривая 1) и DIBL (кривая 2) от диаметра рабочей области

Зависимость  $\sigma(SS)$  имеет ярко выраженный нелинейный убывающий характер, зависимость  $\sigma(DIBL)$ , напротив, практически монотонно возрастает. При этом максимальные стандартные отклонения  $\sigma_{max}(SS)$  и  $\sigma_{max}(DIBL)$  равны 2,8 мВ/дек и 3 мВ/В.

Анализируя вариации параметра  $U_{th,lin}$ , можно сделать аналогичный вывод о том, что они, обусловленные эффектами RDF, невелики. В данном случае максимальное стандартное отклонение составляет 4.7 мВ. Эта величина оказывается значительно меньше теплового потенциала и сопоставима с тем же действием, что оказывает на параметр  $U_{th,lin}$  наличие высокоалегированных рабочих областей [15]. По совокупности, можно утверждать, что ключевые характеристики подпорогового режима кремниевых полевых GAA нанотранзисторов с низко легированной рабочей областью невосприимчивы к проявлению эффектов RDF.

Чтобы исследовать причины вариативности тока стока  $I_{d,lin}$ , проанализированы его взаимодействия со флуктуациями порогового напряжения  $U_{th,lin}$  и проводимости  $Gm,max$ . По методике, изложенной в [8] были рассчитаны коэффициенты корреляции между ними. Результаты расчётов приведены на рис. 4.

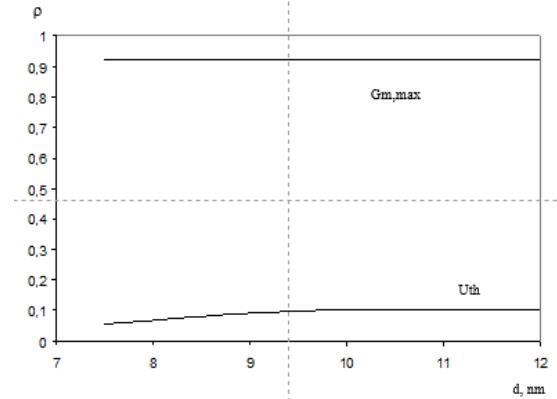


Рис. 4. Зависимость коэффициента корреляции  $\rho$  от диаметра рабочей области

Из полученных данных следует, вариативность тока  $I_{ds}$  определяется изменениями параметра  $Gm,max$ . При этом компоненты, которые могут порождать его флуктуации достаточно ограничены. К ключевым можно отнести следующие параметры:  $Lg$ ,  $d$ ,  $tox$ ,  $\mu_0$  и  $Rsd$ . В этом списке присутствуют да новых параметра -  $\mu_0$  – низко полевая подвижность и  $Rsd$  - последовательное сопротивление стока и истока. Однако, только эти параметры характеризуются выраженной зависимостью от эффектов RDF.

На рис. 5 приведены экстрагированные зависимости вариации значений параметров  $Ids$  и  $Gm,max$  в исследуемом диапазоне радиусов рабочей области  $R$ .

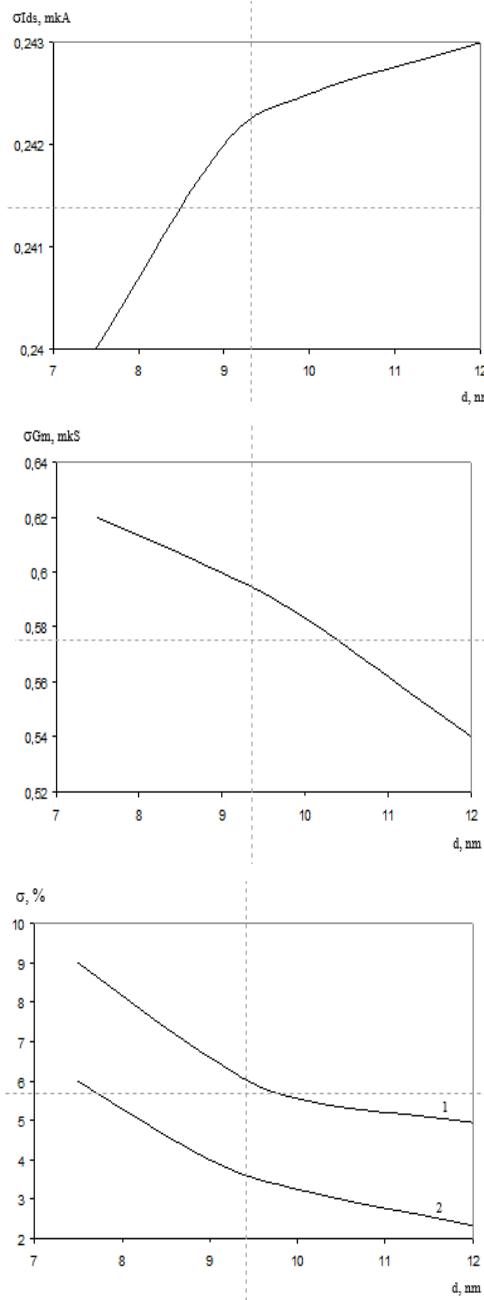


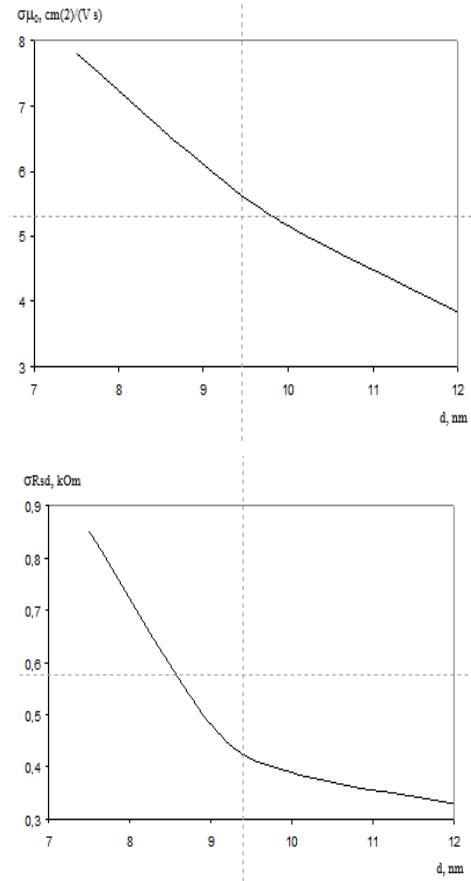
Рис. 5. Зависимость вариации тока  $Ids$  (верхний рисунок) и  $Gm,max$  (средний рисунок) от  $d$  и их представление в процентном отношении (нижний рисунок),

где 1 -  $\sigma_{Ids}(d)$ , 2 -  $\sigma_{Gm,max}(d)$

Из приведённых результатов следует, что флуктуации тока  $Ids$  незначительно увеличиваются с ростом радиуса рабочей области или со снижением концентрации инжектированной примеси. Абсолютные вариации параметра

$Gm,max$  демонстрируют противоположное поведение – с ростом они монотонно снижаются. Причем более значимо, чем вариации тока. В процентном выражении – более 10% для параметра  $Gm,max$  и менее 1% для  $Ids$ . Следует отметить что, с ростом  $R$  относительные вариации исследуемых параметров практически пропорционально снижаются и не зависят от уровня концентрации побочной примеси. Средние значения тока  $Ids$  и проводимости  $Gm,max$  коррелируют с возрастанием/снижением параметра  $R$  из-за проявления ККЭ, которые определяют управляемость затвора протекания тока через транзистор. Следует отметить, по мере уменьшения  $R$  относительная флуктуация тока  $Ids$  увеличивается из-за общей тенденции снижения среднего значения. То же свойство присуще и параметру  $Gm,max$ .

На рисунке 6 представлены зависимости вариации параметров  $Rsd$  и  $\mu_0$  (которые были определены выше) от радиуса рабочей области.



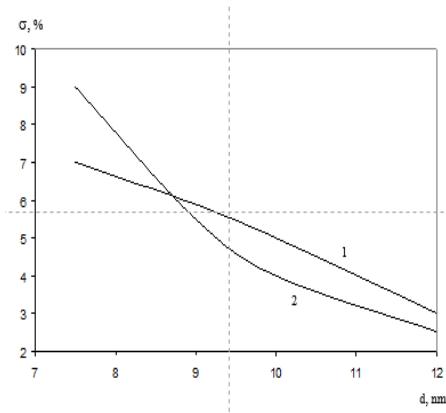


Рис. 6. Зависимость вариации подвижности  $\mu_0$  (верхний рисунок) и сопротивления  $R_{sd}$  (средний рисунок) от  $d$  и их представление в процентном отношении (нижний рисунок), где 1 -  $\sigma R_{sd}(d)$ ,  
2 -  $\sigma \mu_0(d)$

В отличие от поведения аналогичной зависимости для тока  $I_{ds}$  абсолютные значения вариаций  $R_{sd}$  и  $\mu_0$  возрастают по мере уменьшения параметра  $d$ . При этом зависимости  $\text{sigm}(\mu_0)$  и  $\text{sigm}(R_{sd})$  имеют разную крутизну. Однако, изменение величины стандартного отклонения по рассматриваемому диапазону  $d$  составляет примерно 50%. Это позволяет сделать вывод об одинаковом влиянии вариаций параметров  $R_{sd}$  и  $\mu_0$  на вариации тока  $I_{ds}$ . Относительные вариации  $R_{sd}$  и  $\mu_0$  следуют той же тенденции, что характерна для относительных флуктуаций параметров  $I_{ds}$ ,  $\text{lin}$  и  $G_{m,\max}$ . Отметим, что их диапазон составляет примерно одинаковое значение процентов. Такое совпадение обосновано тем, что по мере уменьшения радиуса рабочей области происходит одинаковое возрастание средних значений этих параметров. В совокупности с ростом их абсолютных вариаций поддерживается диапазон значений относительных вариаций от 3% до 9%. Следует отметить, что снижение концентрации инжектированной примеси в рабочей области положительным образом влияет на флуктуации параметра  $\mu_0$ . А вариации  $R_{sd}$  напротив увеличиваются из-за возможно больших расстояний между отдельными частицами легирующей примеси мышьяка.

На рис. 7 показаны диаграммы разброса тока  $I_{ds}$  относительно параметров  $R_{sd}$  и  $\mu_0$ .

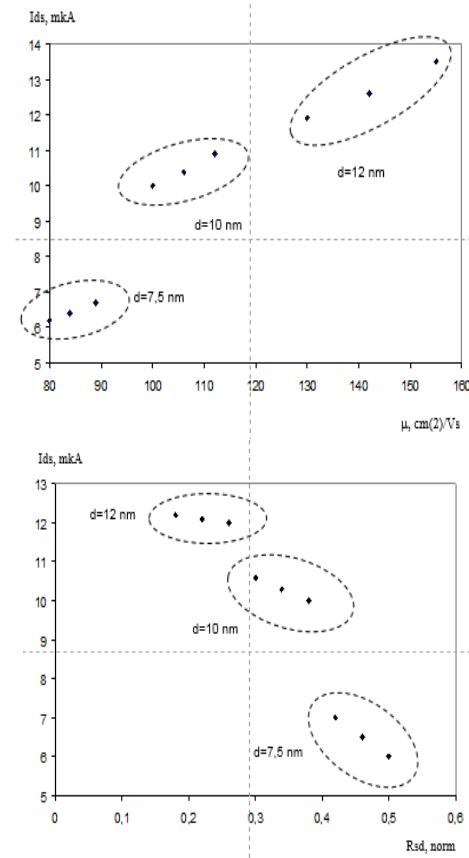


Рис. 7. Диаграммы разброса тока  $I_{ds}$ - $\mu_0$  (верхний рисунок) и  $I_{ds}$ - $R_{sd}$  нижний рисунок

Вариативность параметра  $I_{ds}$  сильно коррелирует с характерным поведением параметров, имеющих электрическую природу. В нашем случае это  $R_{sd}$  и  $\mu_0$ . Из представленных данных следует, что флуктуации  $R_{sd}$  и  $\mu_0$  согласовано влияют на абсолютные отклонения параметра  $I_{ds}$ . Выше было показано, что снижение концентрации инжектированной примеси в рабочей области существенно снижает флуктуации  $\mu_0$  по сравнению с ростом разброса параметра  $R_{sd}$ , однако, что следует из рис. 7, флуктуации тока  $I_{ds}$  уменьшаются. Из приведенных данных следует, что по мере роста величины  $R$  чувствительность существенно снижается. Это приводит к уменьшению влияния флуктуаций параметров  $R_{sd}$  и  $\mu_0$  на вариативность тока  $I_{ds}$ . Снижение управляемости по току  $I_{ds}$  при малых  $R$  приводит к небольшим относительным отклонениям параметра  $I_{ds}$ .

Абсолютные флуктуации параметра  $G_{m,\max}$  зависят от вариативности параметров  $R_{sd}$  и  $\mu_0$ . С уменьшением параметра  $R$  концентрация инжектированной примеси в рабочей области возрастает. Это приводит к росту флуктуаций параметра  $\mu_0$  и, следовательно,  $G_{m,\max}$ , что иллюстрируется рис. 7. И наоборот, увеличение радиуса рабочей области снижает разброс параметра

$\mu_0$ , но усиливает влияние вариативности параметра  $R_{sd}$ . Таким образом, конкурирующая зависимость между вариациями  $R_{sd}$  и  $\mu_0$ , во-первых, снижает вариативность параметра  $G_{m,max}$  по сравнению, параметром  $I_{ds}$ , во-вторых, согласованным выбором радиуса рабочей области и концентрации индуцированной примеси (в нашем случае мышьяка) можно минимизировать флуктуации параметра  $G_{m,max}$ .

## 5. Заключение

Разработан способ моделирования флуктуаций электрофизических характеристик кремниевых полевых GAA нанотранзисторов с учетом RDF механизма, индуцируемых высоколегированными участками источника/стока. При помощи численного 3D-моделирования было проведено исследование влияния RDF-эффектов на характеристики GAA нанотранзисторов с фиксированной длиной и изменяющимся радиусом рабочей области. Показано, что вариативность тока транзистора и его проводимости всецело определяются флуктуациями подвижности и последовательного сопротивления. Вариативность порогового напряжения не коррелирует с разбросом тока и проводимости. Флуктуации ряда ключевых параметров, в частности порогового

напряжения и подпорогового наклона, невелики и практически не зависят от радиуса рабочей области. Установлено, что конкурирующая зависимость между вариациями электрическими параметрами снижает флуктуации проводимости по сравнению с разбросом тока  $I_{ds}$ , а согласованным выбором радиуса рабочей области и концентрации индуцированной примеси можно минимизировать флуктуации проводимости. Если минимизировать инжекцию легирующих примесей из областей стока и истока в рабочую область транзистора при максимально возможном радиусе рабочей области, то возможно решить две задачи: снизить флуктуации тока и проводимости, а также уменьшить влияние коротко-канальных эффектов и повысить защиту от пробоя транзистора.

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № FNEF-2024-0003 "Методы разработки аппаратно-программных платформ на основе защищенных и устойчивых к сбоям систем на кристалле и сопроцессоров искусственного интеллекта и обработки сигналов".

# The Effect of Random Fluctuations of a Doping Impurity on the Characteristics of Field-Effect Silicon GAA Nanotransistors

N. Masalsky

**Abstract.** The effects of random fluctuations of an alloying impurity on the electrophysical characteristics of silicon field GAA nanotransistors with different radii of the working area are investigated. It is shown that transients with a smaller radius are characterized by a decrease in the average value and variation of the subthreshold slope and the DIBL effect, thereby increasing resistance to short-channel effects. On the contrary, the relative variations of the transistor drain current increase with decreasing diameter, which is associated with a decrease in the conductivity of the working area with narrower cross-sections. The absolute fluctuations of the flow current depend significantly on the amount of impurity penetrating into the working area. To determine the causes of fluctuations in the flow currents of silicon field GAA nanotransistors, statistical characteristics of the source/drain series resistance and low field mobility were studied. These parameters critically affect the current spread of the transistor drain at the same time. To offset the influence of the diffusion mechanism of the alloying impurity into the working area, it is recommended to limit the level of doping of the drain/source areas and use relatively large cross-sections of the working area from the range of possible ones. This will ensure stable electro-physical characteristics of transistors with high parity of short-channel effects.

**Keywords:** silicon nanotransistor with surrounding gate (GAA), fluctuation of dopant, fluctuation of conductivity and mobility, flow current drain silicon

## Литература

1. More Moore. International Roadmap for Devices and Systems. IRDS, Piscataway, NJ, USA, 2021
2. N Sano, K. Yoshida, G. Park. Fundamental aspect of semiconductor device modeling associated with

- discrete impurities: drift-diffusion scheme. “IEEE Trans. Electron Devices”, (2020), vol. 67, 3323-3328.
3. Н.В. Масальский. Чувствительность распределения потенциала конических ГАА нанотранзисторов к вариациям топологических размеров рабочей области, “Труды НИИСИ РАН”, (2023), т. 13(3), 23-29
4. B. D. Gaynor, S. Hassoun. Fin shape impact on FinFET leakage with application to multithreshold and ultralow-leakage FinFET design. “IEEE Trans. Electron Devices”, (2014), vol. 61, 2738–2744.
5. M. V. Fischetti, W. G. Vandenberghe. Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures, New York, U.S.A.: Springer, 2016.
6. Масальский Н.В. Моделирование ВАХ ультра тонких КНИ КМОП нанотранзисторов с полностью охватывающим затвором. “Микроэлектроника”, (2021), т. 50, 436-444.
7. K. Huang, Statistical Mechanics, 2nd ed. New York, U.S.A.: John Wiley& Sons, 1987.
8. Kubo, M. Toda, N. Hashitsume. Statistical Physics II: Nonequilibrium Statistical Mechanics, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 1991.
9. K. Nakanishi, T. Uechi, N. Sano. Self-consistent Monte Carlo device simulations under nano-scale device structures: Role of Coulomb interaction, degeneracy, and boundary condition. “Technical Digest. Int. Electron Device Meeting”, (2009), Dec 2009, 1–4.
10. C. Jacoboni. Theory of Electron Transport in Semiconductors: A Pathway from Elementary Physics to Nonequilibrium Green Functions. New York, U.S.A.: Springer, 2010.
11. M. Uematsu, K. M. Itoh, G. Mil’nikov, H. Minari, N. Mori. Simulation of the effect of arsenic discrete distribution on device characteristics in silicon nanowire transistors. “Tech. Dig. Int. Electron Devices Meet.”, (2012), 709–712.
12. N. Sano, K. Matsuzawa, M. Mukai, N. Nakayama. On discrete random dopant modeling in drift-diffusion simulations: physical meaning of ‘atomistic’ dopants. “Microelectron. Reliab.”, (2002), vol. 42, 189–199.
13. G. Tomar, A. Barwari. Fundamental of electronic devices and circuits. Springer, 2019.
14. M. Lundstrom, J. Guo. Nanoscale Transistors: Device Physics, Modeling and Simulation. Springer: New York, 2006.
15. J.-P. Colinge, FinFETs and Other. Verlag, New York, NY, USA, 2008.