

УДК 621.382.32

## МОДЕЛЬ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОЙ ЕМКОСТИ SiC МОП ТРАНЗИСТОРА С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСЯМИ И УРОВНЯМИ ЗАХВАТА

**А.А. Тамразян**

*Национальный политехнический университет Армении*

Работа посвящена расчету параметров и характеристик, а также исследованию физических явлений, протекающих в наноразмерных металл-оксид-полупроводниковых (МОП) транзисторах на основе перспективного материала карбида кремния (SiC). При расчетах учтены квантово-размерные явления, связанные с наличием короткого и узкого канала у транзистора, а также двумерность протекающих физических явлений под затвором.

При выполнении работы были исследованы легирующие примеси и их глубокие уровни в запрещенной зоне кристаллов карбида кремния и в различных структурах на их основе и, в частности, МОП транзисторах. Исследованы различного рода центры захвата (ловушки), причины и механизмы их появления в структурах на основе карбида кремния и, в частности, МОП транзисторах. Выявлено, что изменение концентрации ловушек (центров захвата) и глубины энергетических уровней, создаваемых примесями в карбиде кремния, меняет уровень модуляции канала наноразмерного МОП транзистора на основе карбида кремния.

В работе приведены результаты теоретического исследования зависимостей удельной емкости наноразмерного МОП транзистора на основе карбида кремния с учетом того, что примеси в канале транзистора являются глубокими, а в запрещенной зоне присутствуют центры захвата для электронов. Зависимости получены с учетом присутствия поверхностных состояний и двумерного распределения потенциала под затвором. При расчетах также учтено, что пороговое напряжение зависит от длины и ширины канала, а подвижность носителей зависит от температуры, электрического поля и концентрации примесей. Предложена аналитическая модель расчета удельной емкости между затвором и подложкой МОП транзистора с субмикронным каналом. Разработан программный пакет в среде программного обеспечения "Mathematica" для автоматизированного расчета и исследования основных параметров и характеристик наноразмерного SiC МОП транзистора на основе предложенной модели.

**Ключевые слова:** SiC МОП транзистор, удельная емкость, центры захвата и примеси.

**Введение.** На современном этапе развития микро- и наноэлектроники повышаются требования к полупроводниковым материалам. Карбид кремния (SiC) является одним из перспективных материалов для электронной техники

благодаря своим физико-химическим и электрофизическим свойствам, таким как широкая запрещенная зона, высокое напряжение пробоя электрического поля и скорость насыщения электронов, высокие теплопроводность и рабочая температура [1].

В последние годы SiC стал активно рассматриваться как перспективный материал для наноразмерных МОП транзисторов. SiC выгодно отличается от основных полупроводниковых материалов и может работать в экстремальных условиях из-за эффектов короткого и узкого канала, а также сильных электрических полей, при которых работает наноразмерный МОП транзистор [1-5]. Наличие различного рода ловушек в запрещенной зоне является неотъемлемым атрибутом реальных полупроводников и диэлектриков. Несмотря на прогресс в технологии SiC, в настоящее время некоторые вопросы получения совершенных монокристаллов с управляемым содержанием и распределением легирующих примесей остаются нерешенными. Как показывают исследования [4], неконтролируемое легирование в процессе роста кристаллов приводит к появлению различного рода ловушек в широкозонном SiC. Концентрация таких центров донорно-акцепторного характера, по некоторым оценкам, составляет  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . В запрещенной зоне SiC вследствие высокотемпературных технологических процессов, а также при легировании образуются различные структурные дефекты. Наличие примесей, образующих в запрещенной зоне полупроводника различные энергетические уровни, может привести как к нежелательным, так и к полезным эффектам в полупроводниковых приборах. То, что в одних условиях одни и те же примеси могут действовать как ловушки, а в других - как центры рекомбинации, указывает на важность не только контроля за их появлением, но и соответствующего понимания их свойств и учета их влияния на параметры при разработке приборов.

Из-за практических трудностей учета всех основных факторов, влияющих на параметры реальных приборов, анализ работы структур обычно проводится при различных допущениях. Например, при анализе работы МОП транзисторов на основе SiC часто допускается, что скорость носителей в канале всегда насыщена, все примеси являются мелкими и при комнатных температурах полностью ионизированы. В большинстве работ не учтены эффекты, связанные с глубокими примесями, и влияние на характеристики МОП транзисторов, неизбежно присутствующих в реальных полупроводниковых кристаллах различных локальных уровней [4]. При реальном рассмотрении работы наноразмерных МОП транзисторов следует учесть зависимость параметров от легирующих примесей и уровней захвата, а также, что особенно важно, зависимость от двумерного распределения потенциала под затвором, от температуры, электрического поля, концентрации примесей и т.п.

Известно, что для МОП транзисторов в разных рабочих режимах существуют многочисленные факторы, которые влияют на быстродействие и количественную оценку качественных показателей транзистора. Одними из таких важнейших факторов являются разнотипные емкости, присутствующие в транзисторе. В разных режимах работы транзистора эти емкости заряжаются и разряжаются в зависимости от примененного напряжения затвора, в результате чего характеристики транзистора терпят как позитивные, так и паразитические изменения. Для реального МОП транзистора все составные емкости можно условно разделить на две группы – собственные емкости транзистора и паразитические. Собственные емкости относятся к физическим параметрам транзистора, которые описывают работу устройства и связаны с зарядом, накопленным на затворе и в канале.

В настоящей работе рассчитана удельная емкость между затвором и подложкой наноразмерного SiC МОП транзистора с учетом влияния глубоких примесных уровней, уровней захвата в канале и окисле и других вышеуказанных факторов. В рамках предложенной модели область канала представлена как потенциальная яма треугольной формы с размерно-квантованными электронными уровнями [5,6] в направлении, перпендикулярном к поверхности SiC. Так как общая плотность носителей в инверсионном слое в квантомеханическом случае меньше, чем в классическом, без учета влияния глубоких уровней и уровней захвата, то понятно, что наличие вышеуказанных факторов в обоих случаях будет иметь значительное влияние на параметры транзистора.

**Теоретическая часть.** Рассмотрим физические процессы в субмикронном p-канальном SiC МОПТ. При этом полагаем, что примеси являются глубокими, в запрещенной зоне присутствуют электронные центры захвата, на поверхности полупроводника–окисла имеются поверхностные состояния с концентрацией  $D_s$ , а также учитываем, что в оксидном слое, кроме фиксированного заряда, имеются электронные центры захвата, которые могут взаимодействовать с каналом посредством туннельного просачивания электронов через тонкий окисел.

Формирование связанного на ловушках объемного заряда может привести к изменению двумерного распределения потенциала под затвором и ширины обедненных областей вблизи истока и стока. При наличии явления прилипания время нахождения электронов в центре может превышать на порядок время жизни носителей тока, что существенно уменьшает подвижность носителей в канале. Захват носителей на этих уровнях зависит от их энергетического расположения, сечений захвата носителей заряда, концентрации и заряда ловушек. Принимаем также, что при комнатных температурах не все глубокие

акцепторные центры полностью ионизированы и центры захвата для электронов расположены в верхней половине запрещенной зоны.

В рамках нашей задачи при нахождении двумерного потенциала учитывается зависимость его величины от длины и ширины канала. При малых размерах канала изменение его геометрических размеров имеет существенное значение. Для учета геометрического эффекта двумерного потенциала воспользуемся моделью разделительного заряда от Яу [6]. Также учитывается двумерное распределение потенциала под затвором.

В результате при аналитическом расчете выражения двумерного потенциала нами получено следующее соотношение, с помощью которого можно вычислить двумерный потенциал в любой точке канала по направлениям вдоль (направление  $y$ ) и поперек (направление  $x$ ) канала [6-8]:

$$\psi(x, y) = \frac{2(K_1 U_d + |U_B| + B\phi_B) \cdot h_c}{\pi L} \cdot \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi y}{2X_{dm}}}{ch \frac{\pi L}{2X_{dm}}} \cdot \sin \frac{\pi x}{2X_{dm}} + 2Q_1 \left( X_{dm} \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + |U_B| + B\phi_B,$$

где  $\phi_B$  – потенциал Ферми в подложке;  $U_B$  – напряжение подложки;  $U_d$  – напряжение стока;  $B$  – фактор Брауна;  $L$  – длина канала;  $X_{dm}$  – глубина обедненного слоя;  $Q_1$  – суммарный заряд, который учитывается при решении уравнения Пуассона для нахождения двумерного потенциала под затвором;  $Q_1$  включает заряд размерно-квантованных свободных электронов в канале, заряд обедненной области в подложке, а также заряд, захваченный в центрах захвата и на поверхностных уровнях.

При расчете емкостей транзистора воспользуемся моделью Ли (рис.1), в которой представлены линии разграничений обедненных областей при разных рабочих режимах МОП транзистора. При помощи модели возможно разделить воздействие обедненных слоев (т.е. напряжений) истока, затвора и стока [9]. Воздействие обедненных слоев истока и стока на обедненный слой подзатворной области учитывается весовым коэффициентом  $\xi$ , с помощью которого устанавливается, что в подзатворной области заряд “треугольно-подобного” обедненного слоя больше не управляется напряжением  $U_g$  затвора, а обусловлен напряжениями  $U_s$  истока и  $U_d$  стока.

Следует отметить, что величины глубин проникновения обедненных слоев стока и истока не прямо пропорциональны, что обусловлено большей величиной напряжения стока (эффект модуляции канала).

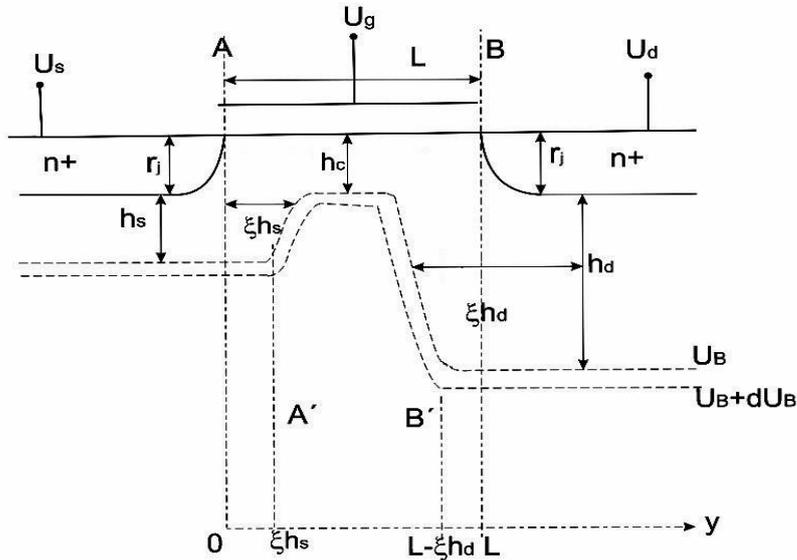


Рис.1. Границы обедненных областей n-МОК транзистора в рабочем режиме

На основе рис.1 для емкости слоев единичной толщины обедненных слоев истока, канала и стока получим следующие выражения:

$$C_s \cong \xi h_s \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{h_s + r_j}, C_c \cong [L - \xi(h_d + h_s)] \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{h_c}, C_d \cong \xi h_d \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{h_d + r_j},$$

а для удельных (слоя единичной площади) емкостей:

$$C_s \cong \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{h_s + r_j}, C_c \cong \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{h_c}, C_d \cong \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{h_d + r_j},$$

где

$$h_s \equiv \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{qN_a^-} (|U_B| + U_{bi})}, h_c \equiv \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{qN_a^-} (|U_B| + \psi_s)},$$

$$h_d \equiv \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{qN_a^-} (|U_B| + K_1 U_d + U_{bi})} -$$

- соответственно ширины обедненных слоев соответствующих областей;  $\varepsilon_{SiC}$  – диэлектрическая проницаемость SiC;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума;  $r_j$  – радиус p-n перехода;  $N_a^-$  – концентрация ионизированных глубоких акцепторов.

В результате в режиме слабого сигнала для расчета удельных межобластных емкостей транзистора получим следующие выражения:

исток-подложка:

$$C_{sb} \cong \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{qN_a^-} (U_B / + U_{bi}) + r_j}} ;$$

сток-подложка:

$$C_{db} \cong \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{qN_a^-} (U_B / + U_{bi} + K_I U_d) + r_j}} ;$$

исток-сток:

$$C_{ds} = \frac{C_{sb} C_{db}}{C_{sb} + C_{db}},$$

поскольку имеем поочередное соединение для  $C_{sb}$  и  $C_{db}$ ;

затвор-подложка:

$$C_{gb} \cong \frac{C_{ox} \cdot C_c}{C_{ox} + C_c} = C_{ox} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{qN_a^-} (U_B / + \psi_s)}} \Bigg/ C_{ox} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{qN_a^-} (U_B / + \psi_s)}} ,$$

поскольку в области канала имеем поочередное соединение  $C_{ox}$  и  $C_c$ ;

затвор-исток и затвор-сток:

$$C_{gs} = C_{gd} \cong C_{ox} + C_{ox} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{r_j} \Bigg/ \left( C_{ox} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{SiC}}{r_j} \right),$$

поскольку имеем поочередное соединение  $C_{ox}$  с емкостями обедненных слоев, а также параллельное соединение этой емкости с  $C_{ox}$ .

**Результаты моделирования.** Представлены результаты численных расчетов, проведенных для 4H-SiC МОП транзистора с параметрами:

$$x = (6...10) \text{ нм}, t_{ox} = (2...25) \text{ нм}, \varepsilon_{SiC} = 10, \varepsilon_{ox} = 3,8, N_a = (1...100) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3},$$

$$D_s = (0...0,15) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}, n_i = 8,2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}, L = (50...300) \text{ нм}, W = (0,1...2) \text{ мкм},$$

$$r_j = (0,01...1,5) \text{ мкм}, \Delta E_a = (0,05...0,26) \text{ эВ}, \beta = (0...0,35), B = (1...2), U_a = (0...10) \text{ В},$$

$$U_g = (0...4) \text{ В}, U_B = (0...1) \text{ В}, \phi_b = (0,2...0,5) \text{ В}, N_g = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} [8-9].$$

На рис. 2-5 приведены зависимости удельной межобластной емкости ( $\Phi/\text{см}^2$ ) между затвором и подложкой от разных параметров транзистора. Выбор удельной емкости обусловлен тем фактом, что это единственная из межобластных емкостей транзистора величина, которая зависит от концент-

рации ловушек и глубины уровня акцепторных примесей. Отметим, что для остальных межобластных емкостей зависимость от глубины уровня акцепторных примесей повторяет зависимости, полученные для удельной емкости между затвором и подложкой.

Из зависимостей, приведенных на рис. 2 и 3, видно, что увеличение концентрации ловушек (концентрация поверхностных ловушечных состояний) приводит к увеличению удельной емкости между затвором и подложкой.

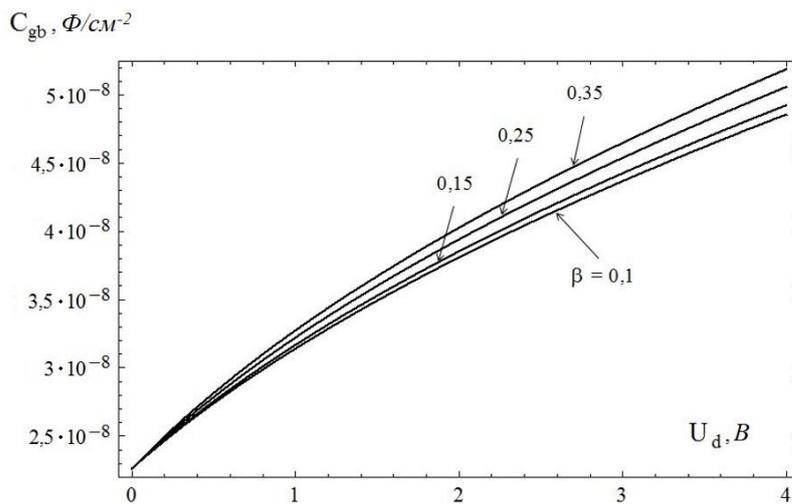


Рис.2. Зависимость удельной емкости затвор-подложка от стокового напряжения при различных концентрациях центров захвата в канале

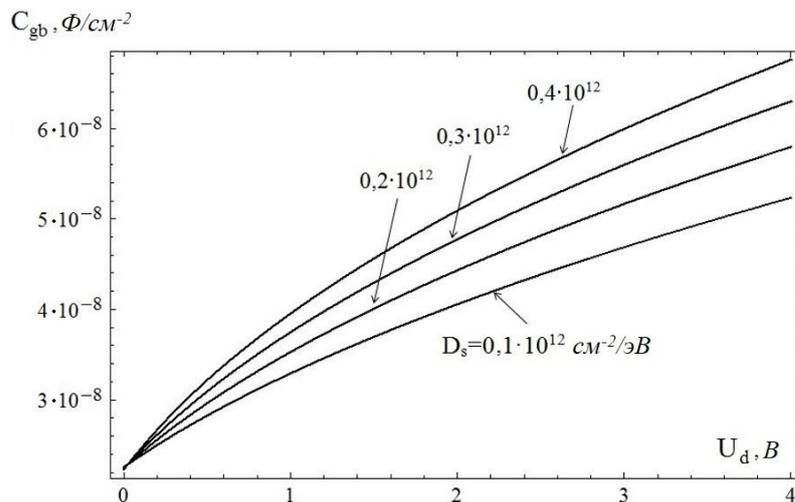


Рис.3. Зависимость удельной емкости затвор-подложка от стокового напряжения при различных концентрациях заряда на поверхностных уровнях

Это объясняется тем, что на ловушках затворного слоя (канала) накапливаются задержанные дополнительные заряды, которые и приводят к увеличению емкости данной области. Из приведенных зависимостей видно, что увеличение стокового напряжения приводит к увеличению емкости между затвором и подложкой, что, в свою очередь, является результатом проникновения обедненного слоя из стоковой области в глубь подзатворной области.

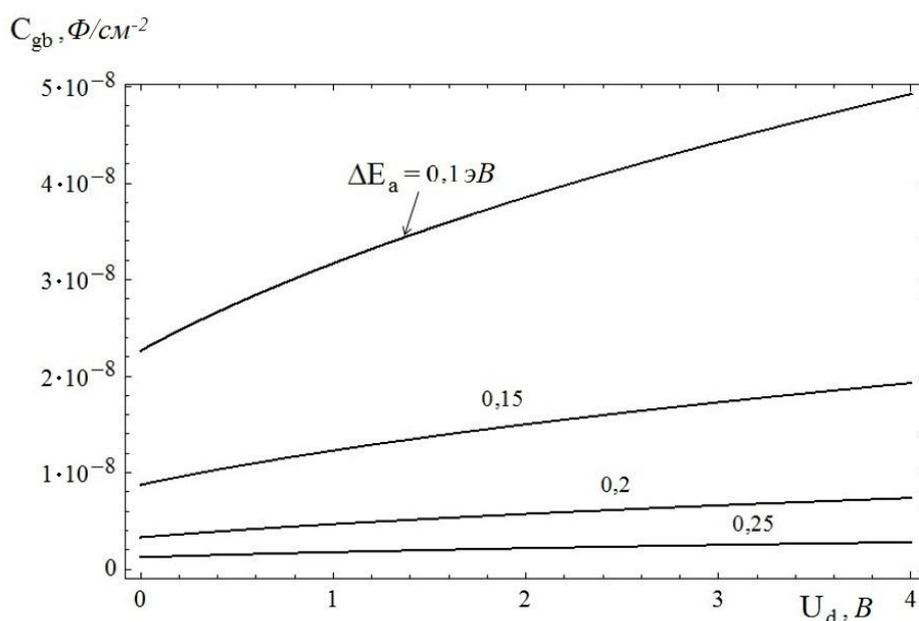


Рис.4. Зависимость удельной емкости затвор-подложка от стокового напряжения при различных глубинах примесных уровней

Из полученных на рис. 4 и 5 зависимостей можно увидеть, что удельная емкость между затвором и подложкой уменьшается, когда увеличивается энергетический зазор ( $\Delta E_a$ ) между акцепторными примесными уровнями и потолком валентной зоны (т.е. когда примесный уровень становится более “глубоким”). Данный эффект обусловлен тем, что в подзатворной области (в канале) глубина обедненного слоя уменьшается с углублением примесных уровней. Это объясняется уменьшением концентрации ионизированных примесных атомов в подложке. Увеличение концентрации примесных атомов, в свою очередь, приводит к увеличению глубины подзатворного обедненного слоя, и в результате удельная емкость между затвором и подложкой увеличивается.

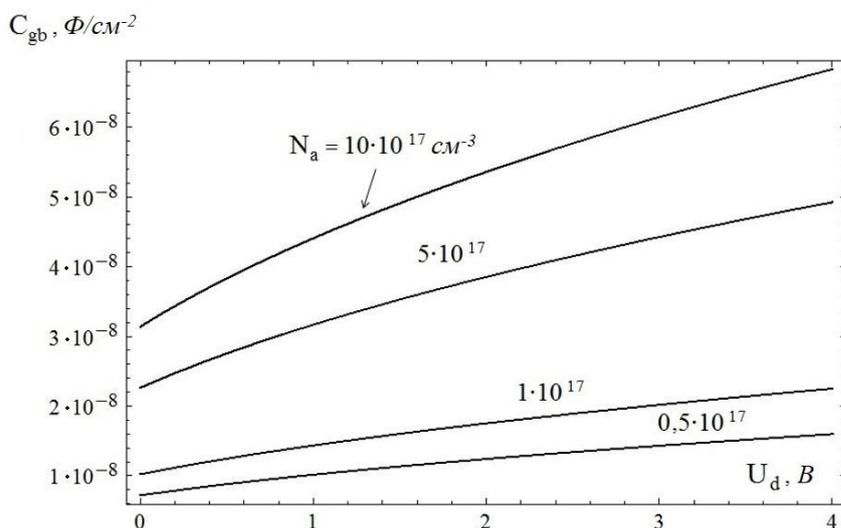


Рис.5. Зависимость удельной емкости затвор-подложка от стокового напряжения при различных концентрациях примесей

### Выводы

1. Полученные результаты показывают, что удельные емкости, в частности удельные емкости между затвором и подложкой наноразмерного SiC МОП транзистора, зависят от концентрации ловушек и поверхностных ловушечных состояний, а также от концентрации примесных атомов и энергетического зазора между акцепторными примесными уровнями и потолком валентной зоны. Изменяя эти параметры, можно управлять удельной емкостью транзистора.

2. На основе предложенной модели разработан программный пакет в среде программного обеспечения "Mathematica" для расчета удельной емкости.

### Литература

1. Progress in SiC: from material growth to commercial device development / **C.H. Carter, V.F. Tsvetkov, R.C. Glass, et al** // Material Science & Engineering.- 1999. - B61. - P.1 - 8.
2. **Akers L.A. and Sanchez J.J.** Threshold voltage models of short, narrow and small geometry MOSFET's: A review // Solid-State Electronics. - 1982. - V.25, №7. - P. 621-641.
3. **Mutlu A.A., Gunther N.G., Rahman M.** Analysis of two-dimensional effects on subthreshold current in submicron MOS transistors // Solid-State Electronics.- 2002. - V. 46. - P. 1133 - 1137.
4. **Bakin A.S., Dorozhkin S.I.** State-of-art in defect control of bulk SiC // Proceed. of Engineering Conference on High-Temperature Electronic Materials, Devices and Sensors. February 22-27.- San-Diego, USA, 1998. - P. 2-13.

5. **Красников Г.Я.** Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2-х частях. - Ч.1. - М.: Техносфера, 2002. - 416с.
6. **Yau L.D.** A Simple Theory to Predict the Threshold Voltage of Short-Channel IGFETs // Solid State Electron. -1974. -V.17. -P 1059-1063.
7. **Буннятян В.В., Арутюнян В.М., Тамразян А.А.** Новая модель порогового напряжения короткоканального SiC МОП транзистора с глубокими примесями и уровнями захвата // Сб. трудов Межд. конфер. МЭС-2008. -М., 2008. -С. 225 - 230.
8. **Буннятян В.В., Тамразян А.А.** Модель расчета I-V характеристик наноразмерного SiC МОП транзистора с глубокими примесями и уровнями захвата // Сб. трудов Межд. конфер. МЭС-2012. -М., 2012. -С. 181 - 186.
9. **Lee H., Chang S., Lee J., Shin H.** Characteristics of MOSFET with non-over- lapped Source-Drain to gate region // 23rd International Conference MIEL.- 2002. - P. 439-441.

*Поступила в редакцию 25.02.2018.  
Принята к опубликованию 05.06.2018.*

## **ԽՈՐ ԽԱՌՆՈՒՐԴԱՅԻՆ ԵՎ ԹԱԿԱՐԴԱՅԻՆ ՄԱԿԱՐԴԱԿՆԵՐՈՎ ՆԱՆՈՉԱՓԱՅԻՆ SiC-ԱՅԻՆ ՄՕԿ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐԻ ՏԵՍԱԿԱՐԱՐ ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿՄԱՆ ՄՈԴԵԼ**

**Ա.Ա. Թամրազյան**

Հետազոտվում են նանոէլեկտրոնիկայի հեռանկարային նյութ հանդիսացող սիլիցիումի կարբիդի (SiC) հիմքով մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ (ՄՕԿ) նանոչափային տրանզիստորներում ընթացող ֆիզիկական երևույթները, հաշվարկվում են հիմնական բնութագրերը և պարամետրերը: Հաշվի են առնվում պոտենցիալի բաշխվածության երկչափայնությունը, կարճ ու նեղ ուղետարով պայմանավորված քվանտաչափային նոր երևույթները:

Ուսումնասիրվել են SiC-ի բյուրեղներում և SiC-ային կառուցվածքներում, մասնավորապես՝ ՄՕԿ կառուցվածքներում հարստացնող խառնուրդները և արգելման գոտում դրանց առաջացրած խոր մակարդակները: Ուսումնասիրվել են SiC-ի բյուրեղներում և SiC-ային կառուցվածքներում, մասնավորապես՝ ՄՕԿ կառուցվածքներում առկա էլեկտրոնային (խոռոչային) թակարդներն ու գրավման կենտրոնները, դրանց առաջացման պատճառները և մեխանիզմները:

Աշխատանքում բերված են SiC-ի հիմքով ՄՕԿ նանոչափային տրանզիստորի տեսակարար ունակության կախվածությունների տեսական հետազոտությունների արդյունքները, հաշվի առնելով, որ հոսքուղում հարստացնող խառնուրդներն առաջացնում են խոր էներգետիկ մակարդակներ, իսկ արգելման գոտում առկա են էլեկտրոնային թակարդներ: Հաշվի են առնվում նաև մակերևութային վիճակների առկայությունը, պոտենցիալի բաշխվածության երկչափայնությունը, կարճ ու նեղ ուղետարով պայմանավորված նոր քվանտաչափային երևույթները, լիցքակիրների շարժունակության՝ հարստացնող խառնուրդների խտությունից, ջերմաստիճանից և դաշտի լարվածությունից

ունեցած իրական կախվածությունները: Արդյունքում՝ առաջարկվել է սուբմիկրոնային չափերի հոսքուղով տրանզիստորի փական-հարթակ տեսակարար ունակության հաշվարկման մոդել: Առաջարկված մոդելի հիման վրա «Mathematica» ծրագրային ապահովման միջավայրում ստեղծվել են SiC-ի հիմքով ՄՕԿ նանոչափային տրանզիստորի հիմնական բնութագրերի ավտոմատացված հաշվարկման ծրագրային փաթեթներ և հաշվարկային ալգորիթմներ:

**Առանցքային բաներ.** SiC ՄՕԿ տրանզիստոր, տեսակարար ունակություն, գրավման կենտրոններ, հարստացնող խառնուրդներ:

## **SPECIFIC CAPACITANCE CALCULATION MODEL OF SiC-BASED NANOSCALE MOSFET WITH DEEP IMPURITIES AND TRAP LEVELS**

**A.A. Tamrazyan**

The work is devoted to the investigation and calculation of the main characteristics and parameters of the physical phenomena taking place in a silicon carbide based (SiC) MOS nanoscale transistors which is a perspective material of nanoelectronics, taking into account the two-dimensional distribution of the surface potential, the new quantum-sized phenomena conditioned on a short and narrow channel.

At carrying out the work, the doping impurities and the deep levels appearing in the forbidden band of SiC structures, particularly in MOS structures have been studied. The electron (hole) traps and "capture centers" in SiC crystals and SiC structures, particularly in MOS structures, the causes and mechanisms of their emergence have been studied. The modeling results show that by changing the depth of the energetic levels of traps which were created by SiC crystal doping impurities, it is possible to change the depth of modulation of MOS nanoscale transistor's channel.

The paper presents the results of a theoretical investigation of the dependence of specific capacitance of nanoscale SiC MOSFET taking into account the fact that the impurities in the transistor channel are deep, and there are trapping centers for electrons in the band gap. The dependences of the carrier mobility on temperature, electric field and impurity concentration are introduced. The presence of surface states, two-dimensional potential distribution under the gate and the dependence of the threshold voltage of the length and width of the channel are also given. A new analytical model for calculating the specific capacitance of transistor with submicron channel is introduced. The software packages and algorithms for the automated calculation of the main characteristics of a SiC-based MOS nanoscale transistor have been developed by means of "Mathematica" software.

**Keywords:** SiC MOSFET, specific capacitance, trap levels and impurity.