

Модель расчета I-V характеристик наноразмерного SiC МОП транзистора с глубокими примесями и уровнями захвата

В.В. Буниатян, А.А. Тамразян

Государственный инженерный университет Армении, vbuniat@seua.am

Аннотация — Проведено теоретическое исследование зависимости стокового тока наноразмерного SiC МОП транзистора с учетом того, что примеси в канале транзистора являются глубокими, а в запрещенной зоне присутствуют центры захвата для электронов. Учтены зависимости подвижности носителей от температуры, электрического поля и концентрации примесей. Также учтены присутствие поверхностных состояний, двумерное распределение потенциала под затвором и учтена зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала. Предложена новая аналитическая модель расчета стокового тока транзистора с субмикронным каналом.

Ключевые слова — карбид кремния (SiC), узко- и короткоканальный МОП транзистор, I-V характеристики, подвижность носителей, глубокие легирующие примеси, центры захвата.

I. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития микро- и нанoeлектроники повышаются требования к качеству полупроводниковых материалов. Карбид кремния (SiC) является одним из перспективных материалов для современной и будущей электронной техники [1]-[3], благодаря своим уникальным физико-химическим и электрофизическим свойствам, таким как широкая запрещенная зона, высокое напряжение пробоя электрического поля, высокая скорость насыщения электронов, высокая теплопроводность и высокая рабочая температура. В настоящее время реализован целый класс новых приборов на базе SiC, которые благодаря своим физико-химическим и электрофизическим свойствам выгодно отличаются от аналогов на Si и GaAs. В числе таких приборов реализованы и исследованы новые высоковольтные и лавинно-пролетные диоды [4]-[5], фотодиоды, светодиоды [6], различные газовые и оптические сенсоры [7], биполярные и униполярные транзисторы [8], резонансно-туннельные диоды, гетероструктурные транзисторы [9] и т.п.

В последние годы SiC стал активно рассматриваться как перспективный материал для наноразмерных МОП транзисторов [10]. Известно [11]-[13], что наноразмерный МОП транзистор работает в

экстремальных условиях из-за воздействия эффектов короткого и узкого канала и сильных электрических полей. С этой точки зрения SiC выгодно отличается от основных полупроводниковых материалов МОП транзисторов.

С другой стороны, наличие различного рода ловушек для электронов и дырок в запрещенной зоне является неотъемлемым атрибутом реальных полупроводников и диэлектриков. Несмотря на очевидный прогресс в технологии SiC, в настоящее время некоторые вопросы получения совершенных монокристаллов с управляемым содержанием и распределением легирующих примесей остаются нерешенными. Как показывают исследования [9], [14]-[18], 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} - 10^{16} см⁻³ [14]. В запрещенной зоне SiC вследствие высокотемпературных технологических процессов (во время роста кристаллов и особенно при эпитаксии), а также в процессе легирования, образуются различные структурные дефекты. Как следует из вышеизложенного, наличие примесей, образующих в запрещенной зоне полупроводника различные энергетические уровни, может привести к различным, как нежелательным, так и 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 электрические параметры при разработке приборов.

В отличие от классических полупроводниковых материалов в SiC, благодаря широкой запрещенной зоне легирующие примеси создают глубокие уровни и могут создавать не один, а несколько уровней в запрещенной зоне, причем в некоторых случаях уровни могут быть разного рода (акцепторные и донорные) [9], [14]-[17].

Из-за практических трудностей учета всех основных факторов, влияющих на параметры реаль-

ных 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 все полностью ионизированы. В подавляющем большинстве работ не учтены эффекты, связанные с глубокими примесями, и влияние на характеристики МОП транзисторов неизбежно присутствующих в реальных полупроводниковых кристаллах различных локальных уровней [9], [14]-[17]. Мы считаем, что предположения о том, что примеси в SiC являются мелкими и отсутствуют какие-либо локальные уровни в запрещенной зоне SiC, являются в значительной мере упрощенными. При реальном рассмотрении работы наноразмерных МОП транзисторов следует учесть зависимость параметров от легирующих примесей и уровней захвата, от температуры и электрического поля, от концентрации примесей, от размерности канала, а также, что особенно важно, учесть двумерное распределение потенциалов под затвором.

В настоящей работе рассчитан стоковый ток наноразмерного SiC МОП транзистора. Учтено влияние глубоких примесных уровней, уровней захвата в канале и окисле и другие вышесказанные факторы. В рамках предложенной модели область канала представлена как потенциальная яма треугольной формы с размерно - квантованными электронными уровнями [17]-[20] 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 присутствие вышеуказанных факторов в обоих случаях будет иметь значительное влияние на пороговое напряжение и, следовательно, на другие параметры. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость развития нового подхода к идентификации и анализу характеристик наноразмерного МОП транзистора, в частности на основе SiC.

II. ТЕОРИЯ

Для построения вольт-амперной характеристики транзистора и исследования зависимостей стокового тока от различных электрофизических параметров рассмотрим физические процессы в узко- и короткоканальном SiC МОП транзисторе n-типа. Предложена новая модель для расчета стокового тока наноразмерного МОП транзистора на базе SiC. В данной модели учитывается, что легирующие примеси (в нашем случае для подложки p-типа это N_a акцепторные примеси) являются глубокими [9], [14]-[17], в запрещенной зоне присутствуют центры захвата для электронов (расположены в верхней половине запрещенной зоны) [9], [14]-[17], на поверхности полупроводника-окисла присутствуют

поверхностные состояния с концентрацией D_s (эВ/см²) [1], а также с учетом того, что в оксидном слое кроме фиксированного заряда имеются электронные центры захвата, которые могут взаимодействовать с каналом посредством туннельного просачивания электронов через тонкий окисел. Все эти факторы, в свою очередь, значительно влияют на физические процессы, проходящие в транзисторе. В частности, легирующие глубокие акцепторные центры не все полностью ионизированы при комнатных температурах, а связанный на ловушках объемный заряд может привести к изменению двумерного распределения потенциала под затвором и ширины обедненных областей вблизи истока и стока. При наличии явления прилипания, как известно, время нахождения электронов в центре может превышать по величине на порядок время жизни носителей тока. Этот эффект существенно уменьшает подвижность носителей в канале.

В модели также учтены двумерное распределение потенциала под затвором и зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала. Также учитывается зависимость подвижности носителей зарядов от температуры, концентрации примесей, электрического поля и от двумерного распределения потенциала под затвором.

Для повышения точности и эффективности расчетов стокового тока вычислим значения стокового тока соответственно для двух основных режимов работы МОП транзистора - линейного и насыщения.

Для аналитического расчета выражения стокового тока наноразмерного МОП транзистора в линейном режиме воспользуемся известным выражением [1] и, проведя соответственные вычисления для линейного стокового тока, получим следующее выражение, которое с виду напоминает выражения стокового тока для длинноканального МОП транзистора:

$$I_{dl} = \frac{W}{L} \cdot C_{ox} \cdot \mu_{ef} \cdot \left[\frac{U_d}{2} \cdot (U_g - U_T) \right],$$

где U_g и U_d - напряжение затвора и стока, U_T - пороговое напряжение, W и L - ширина и длина канала, μ_{ef} - эффективная подвижность носителей.

В рамках нашей задачи для нахождения эффективной подвижности носителей воспользуемся приближением Коаджей-Томаса и найдем зависимость подвижности носителей от электрического поля [21]:

$$\mu_{ef}(E, T, N) = \frac{\mu_0}{\left[1 + (\mu_0 E / v_s)^{\beta_j} \right]^{1/\beta_j}},$$

где v_s - скорость насыщения электронов, E - напряженность электрического поля, μ_0 -

подвижность носителей при слабых электрических полях, β_j – экспериментальная величина ($\beta_j \approx 0.86 \div 1$).

Подвижность носителей μ_0 при слабых полях зависит от температуры и концентрации примесей. Для расчета μ_0 из [22] имеем следующее полуэмпирическое выражение:

$$\mu_0(T, N) = \mu_{\max}(T_0) \frac{B(N) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\beta_i}}{1 + B(N) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\alpha_i + \beta_i}},$$

$$B(N) = \left(\frac{\mu_{\min} + \mu_{\max} \left(\frac{N}{N_g} \right)^{\gamma_i}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \right) \Bigg|_{T=T_0},$$

где μ_{\max} и μ_{\min} – максимальная и минимальная подвижность носителей, α_i , β_i , γ_i и N_g экспериментальные величины, N – концентрация примесей, T_0 – комнатная температура (300 К), T – рабочая температура МОП транзистора.

В рамках нашей задачи при нахождении порогового напряжения [10] учитывается зависимость порогового напряжения от длины и ширины канала. При малых размерах канала изменение его геометрических размеров оказывает существенное значение на пороговое напряжение. Для учета влияния геометрического эффекта на пороговое напряжение воспользуемся моделью разделительного заряда от Яу [23]. При нахождении порогового напряжения, учтено также двумерное распределение потенциала под затвором. В результате для порогового напряжения [24] получено следующее выражение:

$$U_T = U_{FB} + \psi(x, y) + \frac{Q}{C_{ox}} \left[1 + \frac{\alpha \cdot X_{dm}}{W} - \frac{r_j}{L} \left(1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{\alpha \cdot X_{dm}}{W} \right) \left(\sqrt{1 + \frac{2X_{dm}}{W}} - 1 \right) \right],$$

где U_{FB} – напряжение плоских зон, C_{ox} – удельная емкость окисла под затвором, X_{dm} – глубина обедненного слоя, α – коэффициент обеднения канала под тонким оксидом затвора ($\alpha \approx 0.1 \div 0.9$), r_j – радиус p-n перехода, $\psi(x, y)$ – двумерный потенциал, Q – суммарный заряд под затвором, включающий свободный и пространственный заряд, расчет которого

приведен в нашей предыдущей работе [24], ввиду громоздкости расчеты здесь опущены.

Для аналитического расчета выражения двумерного потенциала [12] нами получено следующее выражение, с помощью которого можно вычислить двумерный потенциал в любой точке канала по направлениям вдоль (y направление) и поперек (x направление) канала:

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

где ϕ_B – потенциал Ферми в подложке, U_B – напряжение подложки, B – фактор Брауна [1], который определяет степень инверсии канала ($B=1$, соответствует слабой инверсии, $B=2$ – сильной инверсии), 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, заряд, захваченный в центрах захвата и на поверхностных уровнях. Расчет Q_1 приведен в нашей предыдущей работе [24], ввиду громоздкости расчеты здесь не представлены.

Известно, что ток насыщения является наиболее важным приборным параметром МОП транзисторов, поскольку имеет значительное влияние на быстродействие схем. Для расчета стокового тока наноразмерного МОП транзистора в режиме насыщения воспользуемся полуэмпирическим выражением [25], в котором учитываются короткоканальные эффекты:

$$I_{ds} = \frac{I_{ds}(0)}{1 - \frac{2I_{ds}(0)R_s}{U_g - U_T} + \frac{I_{ds}(0)R_s}{U_g - U_T + E_s L}},$$

$$I_{ds}(0) = \frac{w v_s C_{ox} (U_g - U_T)^2}{(U_g - U_T + E_s L)}, \quad E_s = \frac{2v_s}{\mu_{ef}},$$

где v_s – скорость насыщения электронов, E_s – напряженность электрического поля, соответствующая насыщению скорости электронов, R_s – последовательное сопротивление истока.

В результате, для аналитического расчета стокового тока наноразмерного МОП транзистора мы

получили два выражения, соответственно при двух основных режимах работы МОП транзистора: в режиме насыщения и в линейном режиме.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты численных расчетов для 4H-SiC МОП транзистора со следующими параметрами:

$x = (6 \dots 10)$ нм, $t_{ox} = (2 \dots 25)$ нм, $\epsilon_{SiC} = 10$, $\epsilon_{ox} = 3.8$,
 $N_a = (1 \dots 100) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $D_s = (0 \dots 0.15) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$,
 $n_i = 8.2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-3}$, $L = (30 \dots 200)$ нм, $W = (0.3 \dots 2)$ мкм,
 $X_{dm} = (0.03 \dots 0.5)$ мкм, $\Delta E_a = (0.05 \dots 0.26)$ эВ,
 $\beta = (0 \dots 0.35)$, $r_j = (0.01 \dots 1.5)$ мкм, $U_d = (0.0 \dots 5)$ В, $U_g = (0.0 \dots 4)$ В,
 $U_B = (0.0 \dots 1)$ В, $\phi_B = (0.2 \dots 0.5)$ В, $T = (300 \dots 1000)$ К, $k_1 = 1/2$, $B = (1 \dots 2)$, $\mu_{max} = 950 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$,
 $\mu_{min} = 40 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $N_g = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\gamma_i = 0.76$, $\alpha_i = 2.6$,
 $\beta_i = 0.5$, $v_s = 0.86 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, $R_s = (10 \dots 200)$ Ом [10-11], [24].

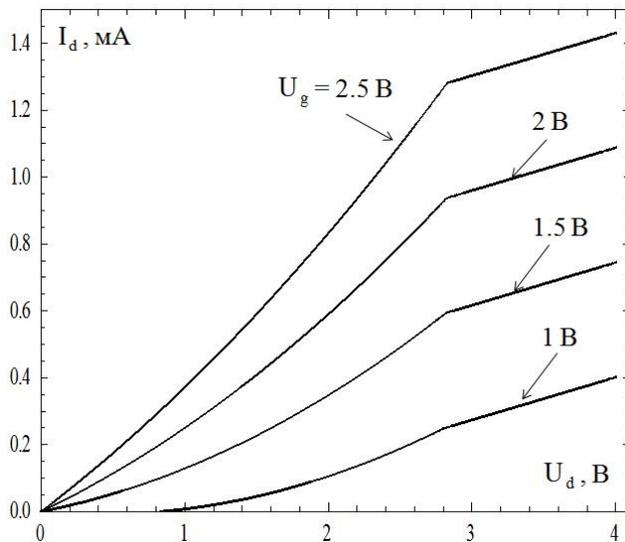


Рис. 1. I-V характеристики при различных значениях напряжения затвора (U_g) ($L=70$ нм, $W=0.9$ мкм, $t_{ox}=4$ нм, $r_j=40$ нм, $N_a=8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $U_B=0$ В)

На рис.1 приведена классическая I-V (вольтамперная характеристика (ВАХ)) транзистора при различных значениях напряжения затвора U_g . Как следует из рис.1, с ростом напряжения затвора стоковый ток увеличивается, аналогично длинноканальному МОП транзистору. На этом и на последующих рисунках видно, что с увеличением напряжения на стоке ток не насыщается, а продолжает расти с увеличением напряжения, т.е. заметен один из известных эффектов короткого канала.

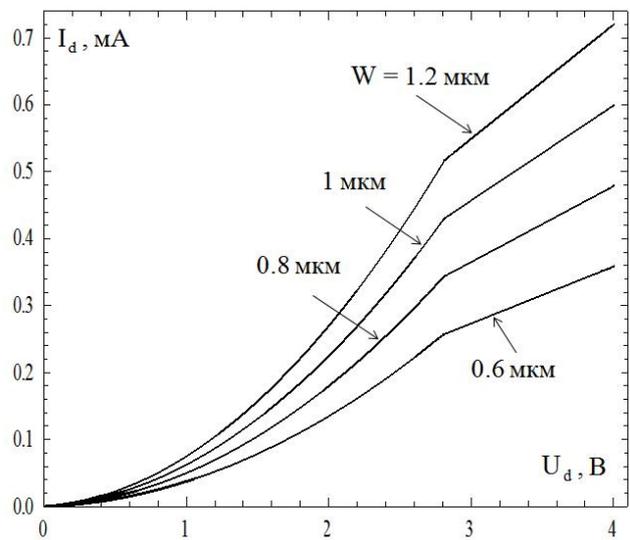


Рис. 2. I-V характеристики при различных значениях ширины канала (W) ($L=70$ нм, $t_{ox}=4$ нм, $r_j=40$ нм, $N_a=8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $U_B=0$ В, $U_g=1.2$ В)

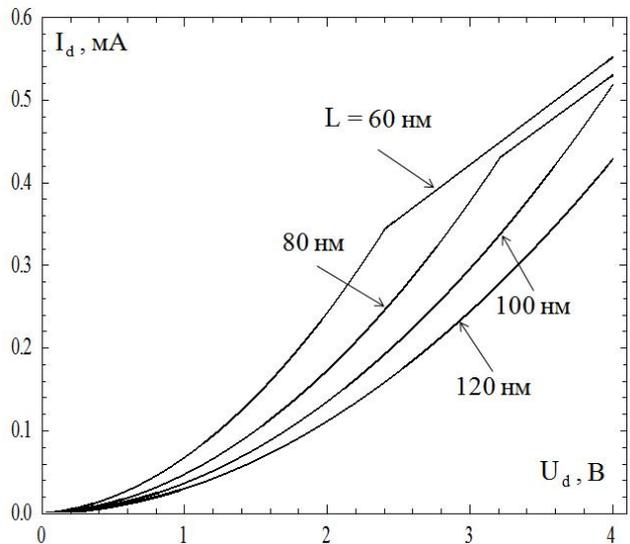


Рис. 3. I-V характеристики при различных значениях длины канала (L) ($W=0.9$ мкм, $t_{ox}=4$ нм, $r_j=40$ нм, $N_a=8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $U_B=0$ В, $U_g=1.2$ В)

Вследствии уменьшения ширины канала наблюдается увеличение порогового напряжения, так как увеличивается пространственный заряд под затвором, для контроля которого необходимо увеличение напряжения затвора. Увеличение порогового напряжения приводит к уменьшению стокового тока при прочих равных условиях (рис. 2). Следует отметить, что из выражения стокового тока непосредственно следует, что с уменьшением ширины канала стоковый ток уменьшается.

При уменьшении длины канала наблюдается уменьшение порогового напряжения, т.е. эффект короткого канала [2], [10], когда из-за проникновения обедненного слоя вглубь канала уменьшается заряд, контролируемый затвором. Уменьшение порогового напряжения приводит к увеличению стокового тока при прочих равных условиях (рис. 3). Следует отметить, что из выражения стокового тока непосредственно следует, что с уменьшением длины канала стоковый ток увеличивается.

Наличие центров захвата в канале и в обедненном слое (β – коэффициент, показывающий сравнительную концентрацию центров захвата [24]) (рис.4), а также наличие зарядов на поверхностных уровнях (D_s) (рис. 5) приводит к уменьшению концентраций свободных носителей и увеличению порогового напряжения при прочих равных условиях, поскольку для поддержания такого избыточного заряда требуются более высокие значения напряжения затвора.

Увеличение энергетического зазора (ΔE_a) между акцепторными примесными уровнями и потолком валентной зоны, т.е., когда примесный уровень становится более “глубоким”, что эквивалентно увеличению концентрации неосновных носителей в подложке, приводит к тому, что пороговое напряжение должно уменьшаться, из-за чего наблюдается увеличение стокового тока (см. рис. 6).

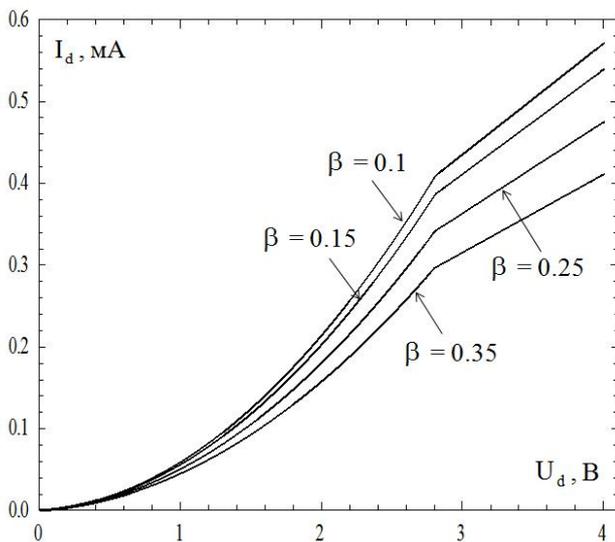


Рис. 4. I-V характеристики при различных концентрациях центров захвата в канале (β)
 ($L=70$ нм, $W=0.9$ мкм, $t_{ox}=4$ нм, $r_j=40$ нм, $N_a=8 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $U_B=0$ В, $U_g=1.2$ В)

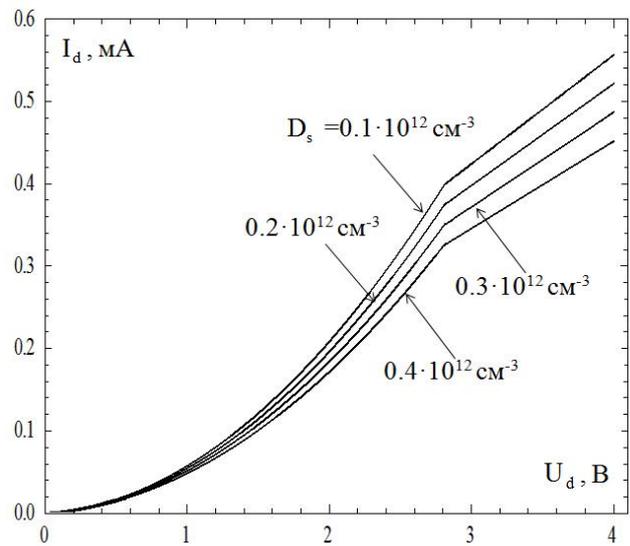


Рис. 5. I-V характеристики при различных концентрациях заряда на поверхностных уровнях (D_s)
 ($L=70$ нм, $W=0.9$ мкм, $t_{ox}=4$ нм, $r_j=40$ нм, $N_a=8 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $U_B=0$ В, $U_g=1.2$ В)

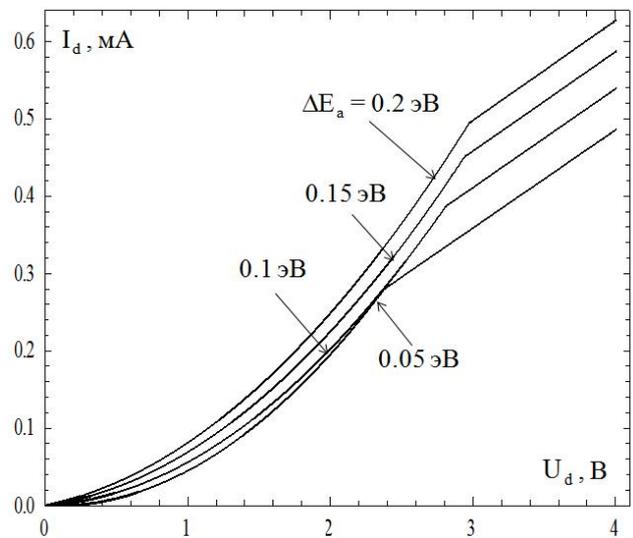


Рис. 6. I-V характеристики при различных глубинах примесных уровней (ΔE_a) ($L=70$ нм, $W=0.9$ мкм, $t_{ox}=4$ нм, $r_j=40$ нм, $N_a=8 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $U_B=0$ В, $U_g=1.2$ В)

В рис.7 приведена вольт-амперная характеристика транзистора при различных значениях температуры T . С увеличением температуры (в зоне высоких температур) наблюдается уменьшение стокового тока и увеличение напряжения отсечки, что обусловлено изменением подвижности носителей, а также уменьшением проводимости канала при прочих равных условиях.

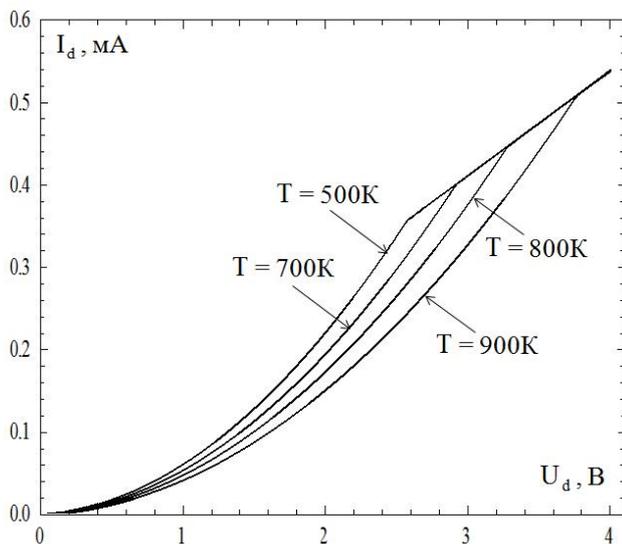


Рис. 7. I-V характеристики при различных температурных режимах (Т) ($L=70$ нм, $W=0.9$ мкм, $t_{ox}=4$ нм, $r_j=40$ нм, $N_a=8 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $U_B=0$ В, $U_g=1.2$ В)

В заключение отметим, что все полученные результаты находятся в соответствии с общими принципами физики полупроводниковых приборов и, в частности, МОП транзисторов [1], [10], [18]-[20] и могут быть использованы при разработке и моделировании различных карбидно-кремниевых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. Second Ed. J. Wiley & Sons. 1981. 868 p.
- [2] Baliga V.J. Trends in power semiconductor devices // IEEE Transaction Electron. Devices. 1996. V. 43. № 10. P.1717-1731.
- [3] Harris G.L., Kelner G., Shur M. Ohmic contacts to SiC. Properties of advanced semiconductor materials // Edited by Levinshtein M.E., Rumyantsev S., Shur M.S. New-York, Wiley. 2001. P. 231-243.
- [4] Buniatyan V.V. and Aroutiounian V.M. Wide gap semiconductor microwave devices // Journal of Physics D: Applied Physics. 2007. V. 40. № 40. P. 6355-6385.
- [5] Buniatyan V.V., Aroutiounian V.M., Soukiassian P.G., et al. Microwave characteristics of Hetero-junction IMPATT diodes based on SiC // J. Phys. IV France. 2006. V.132. P. 140-143.
- [6] Su Y.K., Chiou Y.Z., Chang C.S. et al. 4H-SiC metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors with Ni/ITO electrodes // Solid-State Electronics. 2002. V. 46. P. 2237-2240.
- [7] Spetz A.L., Tobias P., Baranzahi A. et al. Current status of SiC Based High-Temperature Gas Sensors // IEEE Transaction on Electron Devices. 1999. V. 46. № 3. P. 561-566.
- [8] Ryu S., Agarwal A.K., Singh R. et al. 1800V NPN bipolar junction transistors in 4H-SiC // IEEE Electron Device Lett. 2001. V. 22. P. 124-126.
- [9] Danielsson E., Zetterling C.M., Ostling M. Simulation and electrical characterization of GaN/SiC and AlGaN/SiC heterodiodes // Material Science and Engineering. 1999. B61-62. P.320-324.
- [10] Carter C.H., Tsvetkov V.F., Glass R.C. et al. Progress in SiC: from material growth to commercial device development. Material Science & Engineering. 1999. B61. P. 1-8.
- [11] 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.
- [12] Powell S.K., Goldman N., McGarrity J.M., and Bernstein J. Physics-based numerical modeling and characterization of 6H-silicon-carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistors // Journal of Applied Physics. 2002. V.92. № 7. P. 4053-4061.
- [13] 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.
- [14] 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. San-Diego, USA, February 22-27. 1998. P. 2-13.
- [15] Mrian K., Benjamin S., Cooper J. A. Jr. Anomalous high density of interface states near the conduction band in SiO₂/4H-SiC MOS devices // Material Science Forum. 2000, V. 338-342. P. 1069-1072.
- [16] Hartung W., Rasp M., Hofmann D. et al. Analysis of electronic levels in SiC: V, N, Al powders and crystals using thermally stimulated luminescence, Material Science and Engineering. 1999. B61-62. P. 102-106.
- [17] Grillenberger J., Achtziger N., Pasold G. et al. Polytype Dependence of Transition Metal-Related Deep Levels in 4H-, 6H- and 15R- SiC // Material Science Forum. 2002. V. 389-393. P. 573-576.
- [18] Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. В 2-х частях. М.: Техносфера, 2002. Ч. 1. 416 с.
- [19] Masson P., Autran J-Lue, Munteanu D. DYNAMOS : a numerical MOSFET model including quantum-mechanical and near-interface trap transient effects // Solid-State Electronics. 2002. V. 46. P. 1051-1059.
- [20] Arnold E. Charge-Sheet Model for Silicon Carbide Inversion Layers // IEEE Transaction on Electron Devices. 1999. V.46. № 3. P. 497-503.
- [21] Ruff M., Mitlehner H. and Helbig R. // IEEE Trans. Electron Devices. 1994. V. 41. P. 1040-1043.
- [22] Mnatsakanov T.T., Levinshtein M.E., Pomortseva L.I. and Yurkov S.N. Carrier mobility model for simulation of SiC-based electronic devices // Semicond. Sci. Technol. 2002. V. 17. P. 974-977.
- [23] Yau L.D. A Simple Theory to Predict the Threshold Voltage of Short-Channel IGFETs // Solid State Electron. 1974. 17:1059.
- [24] Буниатян В.В., Арутюнян В.М., Тамразян А.А. Новая модель порогового напряжения короткоканального SiC МОП транзистора с глубокими примесями и уровнями захвата // III Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2008". Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2008. С. 225-230.
- [25] Chen K. et al. An Accurate Semi-Empirical Saturation Drain Current Model for LDD N-MOSFET // IEEE Electron Devices Letters. 1996. V. 17. № 3. P. 145-147.