

Е.А. Рындин, А.А. Аль-Саман

КВАЗИДВУМЕРНАЯ ДИФфуЗИОННО-ДРЕЙФОВАЯ МОДЕЛЬ HEMT ТРАНЗИСТОРОВ

Совершенствование структур, методов построения, моделей, методик и средств моделирования транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT – High Electron Mobility Transistor) представляет значительный интерес, так как данные транзисторы являются важными элементами различных узлов радиотехнических систем. В работе предложена квазидвумерная модель на основе диффузионно-дрейфового приближения для исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик AlGaAs/GaAs HEMT транзисторов. Модель учитывает неравномерность пространственных распределений потенциала, электрического поля, электронной температуры, подвижности и дрейфовой скорости электронов. Также она обеспечивает соотношение «точность – сложность», удовлетворяющее как исследовательским целям, так и задачам проектирования. В модели учитываются зависимости подвижности электронов от температуры, концентрации примесей, электрического поля и междолинных переходов, что расширяет область ее применимости. Определение плотности поверхностного заряда электронов в канале проводилось с помощью уравнения баланса зарядов, принимая во внимание наличие дырочного заряда в активном слое с собственной проводимостью, что обеспечило более точное вычисление плотности поверхностного заряда электронов. Реализация модели выполнена с использованием метода конечных разностей и метода Ньютона. Сопоставление результатов моделирования ВAX AlGaAs/GaAs HEMT транзистора с длиной канала 500 нм с экспериментальными данными показывает адекватность предложенной модели. Разработанная модель дает возможность анализа быстродействия транзистора посредством количественной оценки внутренних емкостей и времени пролета электронами канала. Благодаря тому, что параметрами модели являются физически интерпретируемые величины и геометрия транзисторной структуры, она может быть применена для моделирования полевых транзисторов с различными структурными особенностями.

HEMT транзистор; диффузионно-дрейфовая модель; междолинные переходы; время пролета.

E.A. Ryndin, A.A. Al-Saman

QUASI-TWO-DIMENSIONAL DRIFT-DIFFUSION MODEL OF HEMT TRANSISTORS

The development of HEMT transistors structure along with its design and modelling methods is a matter of high interest. That may be associated with its widespread application in RF systems. We have developed a new quasi-two-dimensional model based on the drift-diffusion approximation, which provides an adequate current-voltage and V-C characteristics of AlGaAs/GaAs HEMT transistor. The intervalley transitions along with the field-dependent mobility and the presence of a whole charge in the channel were taken into consideration. That provided a possibility of accurate calculation the non-uniformity of the spatial distributions of potential, electrical field, electron temperature, mobility and electron drift velocity. It also provides an "accuracy-complexity" relationship that satisfies both research and design objectives. The proposed model demonstrates high ability to evaluate the time delay of HEMT transistor since it is capable of quantitatively estimating the intrinsic capacitances values as well as the transit time of electrons beneath the gate. The validation of the model was checked by comparison the calculated current-voltage characteristics with experimental data for AlGaAs/GaAs HEMT transistor with a channel length of 500 nm. The physical nature of the proposed model makes it possible to use it as a tool for analyzing and enhancing the parameters of HEMT transistors. For the same reason it can be utilized for simulation other field-effect devices.

HEMT transistor; diffusion-drift model; intervalley transitions; transit time.

Введение. С момента появления транзистор с высокой подвижностью электронов (НЕМТ – High Electron Mobility Transistor) вызвал огромный интерес, как ключевой элемент микроволновых радиочастотных узлов [1, 2]. Данный интерес вызван высокими подвижностью и концентрацией электронов в каналах НЕМТ транзисторах [3, 4]. В связи с этим в последнем десятилетии многочисленные работы были посвящены совершенствованию их структур, методов построения и моделирования [5]. Развитие технологий выращивания тонких эпитаксиальных слоев и молекулярно-лучевой эпитаксии открывают новые возможности совершенствования параметров НЕМТ транзисторов за счет структурной оптимизации [6–9]. Вместе с тем, многократное повторение экспериментальных исследований является дорогостоящим и трудоемким. По этой причине разработка и исследование методов моделирования таких структур, обеспечивающих адекватность и экономичность с точки зрения временных и вычислительных ресурсов, являются актуальными задачами [10].

Моделирование НЕМТ транзисторов может быть произведено с использованием различных моделей (физических, формальных). Трехмерные и двухмерные физические модели обеспечивают высокую точность [11, 12]. В то же время они характеризуются повышенной сложностью, что в большинстве случаев не позволяет использовать их как инструмент оптимизации параметров в процессе проектирования НЕМТ транзисторов и устройств на их основе.

Целью данной работы является разработка моделей НЕМТ транзисторов на основе диффузионно-дрейфового приближения, обеспечивающих соотношение «точность – экономичность», удовлетворяющее как исследовательским целям, так и задачам проектирования.

Квазидвумерная диффузионно-дрейфовая модель НЕМТ транзисторов. Структура рассматриваемого НЕМТ транзистора схематически представлена на рис. 1. Она включает полужизолирующую $GaAs$ подложку, на которой эпитаксиально выращены 500 нм нелегированный слой $i-GaAs$, барьерный слой, включающий спейсерный слой $i-Al_{1-x}Ga_xAs$ толщиной 3 нм, легированный $n-Al_{1-x}Ga_xAs$ слой толщиной 20 нм, 10 нм нелегированный $i-Al_{1-x}Ga_xAs$ слой и высоколегированный $n-GaAs$ слой толщиной 15 нм. Т-образный затвор имеет в основании длину 500 нм и ширину 2 мкм.

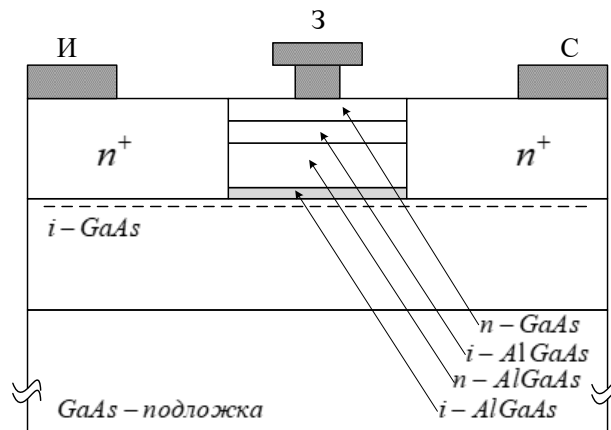


Рис. 1. Структура AlGaAs/GaAs НЕМТ транзистора

С целью расчета вольт-амперных характеристик (ВАХ) НЕМТ направим координатные оси x перпендикулярно плоскости подложки, а y – вдоль направления тока в канале. Ток стока I_d может быть определен интегрированием электронной составляющей плотности тока $J_n(x, y)$ по поперечному сечению канала:

$$I_d = \iint_S J_n(x, y) dS = W \int_0^H J_n(x, y) dx, \quad (1)$$

где H – толщина канала; W – ширина канала; S – площадь поперечного сечения канала.

Учитывая, что ток обусловлен двумя составляющими плотности тока: дрейфовой составляющей, обусловленной градиентом электрического потенциала, и диффузионной, определяемой градиентом концентрации электронов в канале, уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$I_d = W\mu(y) \left[E(y)Q_n(y) - \varphi_T \frac{dQ_n}{dy} \right]; \quad (2)$$

$$Q_n(y) = q \int_0^H n(x, y) dx, \quad (3)$$

где $E(y)$ – распределение электрического поля в канале; $\mu(y)$ – подвижность электронов; $n(x, y)$ – концентрация электронов; $Q_n(y)$ – слоевая плотность заряда электронов в канале; q – элементарный заряд; φ_T – температурный потенциал.

В канале НЕМТ-транзистора помимо электронов, плотность которых определяется концентрацией ионизированных донорных примесей барьерного слоя, присутствуют также и дырки в незначительной концентрации. С учетом того, что область канала НЕМТ нелегирована, соотношение между концентрациями электронов и дырок в канале может существенно изменяться при изменении напряжений между контактами, что необходимо учесть в уравнении баланса зарядов:

$$Q_n(y) + Q_p(y) + Q_G(U_g, U(y)) + Q_B(N_D, U_g) = 0, \quad (4)$$

где $Q_p(y)$ – слоевая плотность заряда дырок в канале; Q_G – поверхностная плотность заряда затвора; Q_B – слоевая плотность заряда в барьерном слое; N_D – концентрация донорной примеси в барьерном слое; U_g – напряжение затвор – исток; $U(y)$ – пространственное распределение потенциала в канале.

В уравнении (4) поверхностная плотность заряда затвора $Q_G(U_g, U(y))$ и слоевая плотность заряда в барьерном слое $Q_B(N_D, U_g)$ определяются следующими соотношениями:

$$Q_G(U_g, U(y)) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{W_B} (U_g - U(y)); \quad (5)$$

$$Q_B(N_D, U_g) = q(N_D + (N_{s0} + \delta N_s U_g))W_B, \quad (6)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника в барьерном слое; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; W_B – ширина барьерного слоя; N_{s0} – плотность поверхностных состояний при нулевом напряжении на затворе; δN_s – подгоночный параметр, учитывающий изменение заряда поверхностных состояний при изменении напряжения на затворе.

Плотность поверхностного заряда дырок $Q_p(y)$ определяется из соображения, что токи утечки по цепи затвора в стационарном состоянии малы и установлено квазиравновесие. В силу этого с учетом (3) $Q_p(y)$ можно выразить через собственную концентрацию n_i :

$$Q_p(y) = -\frac{q^2 H^2 n_i^2}{Q_n(y)}. \quad (7)$$

При постановке (5), (6) и (7) в уравнение баланса зарядов (4) получаем квадратное уравнение:

$$Q_n^2 + Q_n \left[q(N_D + (N_{s0} + \delta N_s U_g))W_B + \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{W_B} (U_g - U(y)) \right] - q^2 H^2 n_i^2 = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) и опуская корень, не имеющий физического смысла, получим следующее выражение для слоевой плотности заряда электронов в канале:

$$Q_n(y) = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2W_B} \left(U(y) - U_{SAT} - \sqrt{(U(y) - U_{SAT})^2 + b^2} \right); \quad (9)$$

$$U_{SAT} = \frac{W_B}{\varepsilon\varepsilon_0} q(N_D + (N_{S0} + \delta N_S U_g))W_B + U_g; \quad (10)$$

$$b = \frac{2qHn_i W_B}{\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (11)$$

Поставляя (9) в выражение (2), получим:

$$I_d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{2W_B} \mu(y) \left[E(y) \left(U(y) - U_{SAT} - \sqrt{(U(y) - U_{SAT})^2 + b^2} \right) - \right. \\ \left. - \varphi_T \frac{d}{dy} \left(U(y) - U_{SAT} - \sqrt{(U(y) - U_{SAT})^2 + b^2} \right) \right]. \quad (12)$$

В выражении (12) $E(y)$, $U(y)$ и $\mu(y)$ являются взаимосвязанными функциями координаты y , что требует для расчета вольт-амперных характеристик НЕМТ учета зависимостей подвижности электронов от напряженности электрического поля и электронной температуры, которые определяются следующими соотношениями [13]:

$$\mu(y) = \frac{\mu_{n,x}^{LIF}(F_n) \operatorname{Rexp}\left(-\frac{\Delta}{kT_n(y)}\right) + \mu_{n,r}^{LIF}(F_n)}{1 + \operatorname{Rexp}\left(-\frac{\Delta}{kT_n(y)}\right)}; \quad (13)$$

$$\mu_{n,v}^{LIF}(F_n) = \frac{\mu_{n,v}^{LI}}{\left(1 + \left(\frac{\mu_{n,v}^{LI} \cdot F_n(y)}{v_{sat,n,v}}\right)^{\beta_n}\right)^{1/\beta_n}}; \quad v = \Gamma, X, \quad (14)$$

где R – отношение концентраций электронов, находящихся в Γ - и X -долинах; k – постоянная Больцмана; Δ – энергетический зазор между рассматриваемыми долинами; $F_n(y)$ – градиент квазиуровня Ферми для электронов; β_n – подгоночный параметр; $v_{sat,n,v}$ – скорость насыщения электронов; $\mu_{n,v}^{LI}$ – зависимость подвижности электронов от концентрации легирующих примесей и температуры, определяемая моделью Коэ–Томаса.

Учитывая, что сила тока в канале не зависит от координаты, то есть производная тока по координате y равна нулю, пространственное распределение потенциала в канале $U(y)$ может быть получено решением дифференциального уравнения второго порядка (15) с граничными условиями (16), (17):

$$\frac{d}{dy} \left[\mu(y) \frac{dU(y)}{dy} \left(U(y) - U_{SAT} - \sqrt{(U(y) - U_{SAT})^2 + b^2} \right) - \right. \\ \left. - \varphi_T \mu(y) \frac{d}{dy} \left(U(y) - U_{SAT} - \sqrt{(U(y) - U_{SAT})^2 + b^2} \right) \right] = 0; \quad (15)$$

$$U(0) = 0; \quad (16)$$

$$U(L) = U_d, \quad (17)$$

где U_d – напряжение сток – исток; L – длина канала.

Из выражений (13) и (14) видно, что подвижность сложным образом зависит от напряженности электрического поля, что затрудняет поиск аналитического решения системы (15)–(17). Ввиду этого, данная система решалась численно с использованием метода конечных разностей и метода Ньютона. На каждой итерации метода Ньютона полученное неравномерное пространственное распределение потенциала $U(y)$ использовалось для вычисления соответствующих пространственных распределений напряженности электрического поля, электронной температуры, подвижности, скорости дрейфа электронов и тока стока.

Система уравнений (15)–(17) позволяет производить расчет и анализ процессов в активной области НЕМТ. Для расчета ВАХ реальных НЕМТ-структур необходимо дополнительно учитывать влияние сопротивлений областей стока и истока на характеристики транзистора. С целью решения данной задачи граничные условия (16) и (17) необходимо переписать в виде:

$$U(0) = I_d R_s; \quad (18)$$

$$U(L) = U_d - I_d R_d, \quad (19)$$

где R_s, R_d – сопротивления областей истока и стока, соответственно, а ток стока I_d определяется выражением (12).

Результаты моделирования. С использованием разработанной системы уравнений (15), (18), (19) было выполнено численное моделирование AlGaAs/GaAs НЕМТ-транзистора со структурой, представленной на рис. 1, и с приведенными выше параметрами. На рис. 2 приведены экспериментальные ВАХ НЕМТ-транзистора (точки) [14] и соответствующие характеристики, полученные в результате численного моделирования.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [14] показало достаточно хорошее согласование, что подтверждает адекватность предложенной модели.

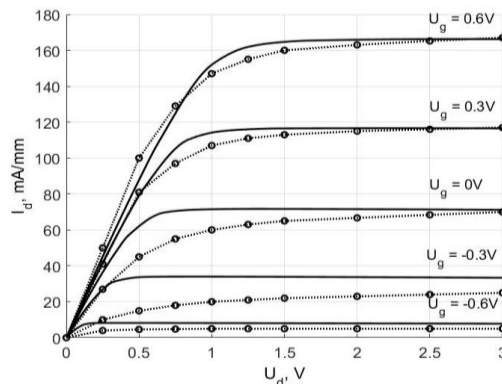


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики НЕМТ-транзистора: экспериментальные данные [14] (точки); результаты моделирования (сплошные линии)

Одними из основных параметров, определяющих динамические характеристики НЕМТ и устройств на их основе, являются внутренние емкости, характеризующие перераспределение зарядов в областях транзистора в зависимости от изменений приложенных напряжений.

Известно, что заряд затвора Q_g может быть определен путем интегрирования распределения слоевой плотности заряда электронов в канале по длине затвора [15, 16]:

$$Q_g = -W \int_0^L Q_n(y) dy. \quad (20)$$

Для вычисления долей заряда, связанных с истоком Q_s и стоком Q_d , может быть использована модель, описанная в [17–20]:

$$Q_d = W \int_0^L \left(1 - \frac{y}{L}\right) Q_n(y) dy; \quad (21)$$

$$Q_s = W \int_0^{\frac{y}{L}} Q_n(y) dy. \quad (22)$$

Емкости определяются как производные заряда по соответствующим напряжениям:

$$C_g = -\frac{dQ_g}{dU_g}; \quad (23)$$

$$C_{gd} = \frac{dQ_g}{dU_d}; \quad (24)$$

$$C_{gs} = C_g - C_{gd}, \quad (25)$$

где C_g – емкость затвора; C_{gd} – емкость затвор – сток; C_{gs} – емкость затвор – исток.

С использованием выражений (21) и (22) могут быть определены и другие емкости для расширенных эквивалентных схем НЕМТ.

На рис. 3 представлены зависимости слоевой плотности заряда электронов в канале рассматриваемого НЕМТ-транзистора от напряжений сток – исток и затвор – исток, соответственно, рассчитанные по формуле (20) численным интегрированием с учетом неравномерности пространственного распределения потенциала.

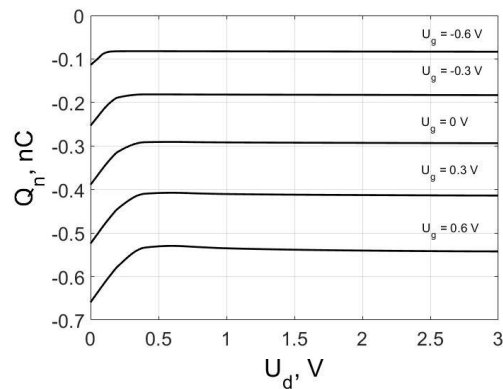


Рис. 3. Зависимости слоевой плотности заряда электронов в канале $AlGaAs/GaAs$ НЕМТ-транзистора от напряжения сток – исток при различных напряжениях затвор – исток

На основе результатов, представленных на рис. 3, с использованием выражения (23) были получены вольт-фарадные характеристики $AlGaAs/GaAs$ НЕМТ-транзистора, приведенные на рис. 4.

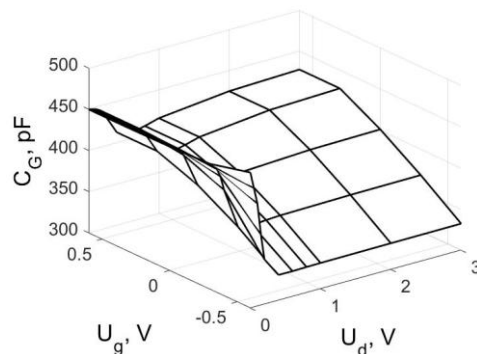


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики $AlGaAs/GaAs$ НЕМТ-транзистора

Еще одним параметром, определяющим динамические характеристики НЕМТ, является время пролета электронами канала [19].

В рассматриваемом случае с учетом того, что предложенная модель (15), (18), (19) позволяет для заданных напряжений на контактах транзистора найти пространственные распределения потенциала, напряженности электрического поля и подвижности электронов, время пролета электронами канала может быть определено следующим образом:

$$t_D = \int_0^L \frac{dy}{v_{dr}(U_d, U_g)}; \quad (26)$$

$$v_{dr}(U_d, U_g) = \mu(y)E(y), \quad (27)$$

где v_{dr} – дрейфовая скорость электронов в канале.

Результаты численного интегрирования (26) для рассматриваемой НЕМТ-структуры приведены на рис. 5.

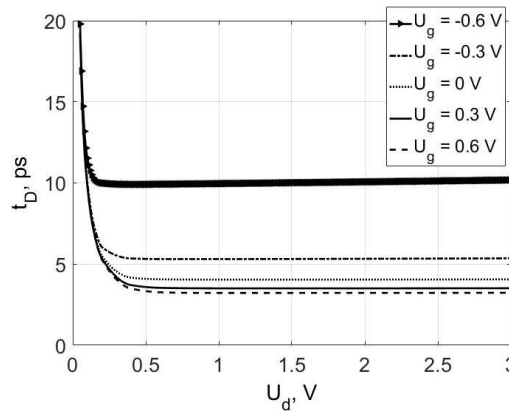


Рис. 5. Зависимости времени пролета электронами канала $AlGaAs/GaAs$ НЕМТ-транзистора от напряжения на сток – исток при разных напряжениях затвор – исток

По результатам, представленным на рис. 5, видно, что при напряжениях сток – исток, превышающих 0,5 В, время пролета остается неизменным вследствие насыщения скорости дрейфа электронов в поле высокой напряженности. При снижении продольной составляющей напряженности поля в канале время пролета экспоненциально увеличивается.

Заключение. В работе предложена квазидвумерная диффузионно-дрейфовая модель $AlGaAs/GaAs$ НЕМТ транзисторов, учитывающая неравномерность пространственных распределений потенциала, электрического поля, электронной температуры, подвижности и скорости дрейфа электронов. На основе предложенной модели были разработаны методика и программные средства численного моделирования, с использованием которых были получены вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики $AlGaAs/GaAs$ НЕМТ, а также зависимости времени пролета электронами канала от напряжений на контактах транзистора, необходимые для анализа динамических характеристик НЕМТ.

Анализ полученных результатов численного моделирования показал, что основными факторами, определяющими вольт-амперные и динамические характеристики НЕМТ, являются зависимость подвижности электронов от продольной составляющей напряженности электрического поля в канале, насыщение скорости дрейфа электронов и междолинные переходы.

Сравнение результатов моделирования ВАХ с экспериментальными данными показало хорошее согласование, что подтверждает адекватность предложенной модели.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-07-00018).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Del Alamo J.A.* Nanometre-scale electronics with III–V compound semiconductors // *Nature*. – 2011. – Vol. 479, No. 7373. – P. 317.
2. *Chung J.W., Hoke W.E., Chumbes E.M. [et al.]* AlGaIn/GaN HEMT With 300-GHz f_{max} // *IEEE Electron Device Letters*. – 2010. – Vol. 31, No. 3. – P. 195-197.
3. *Alabaf M., Saghai H.R.* Room temperature HEMT detector in 0.1–1 THz // *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*. – 2017. – Vol. 130. – P. 407-412.
4. *Lenka T., Panda A.* Characteristics study of 2DEG transport properties of AlGaIn/GaN and AlGaAs/GaAs-based HEMT // *Semiconductors*. – 2011. – Vol. 45, No. 5. – P. 650-656.
5. *Palankovski V., Quay R., Selberherr S.* Industrial application of heterostructure device simulation // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 2001. – Vol. 36, No. 9. – P. 1365-1370.
6. *Chiu H.-C., Fu J. S., Chen C.-W.* RF performance of GaAs pHEMT switches with various upper/lower δ -doped ratio designs // *Solid-State Electronics*. – 2009. – Vol. 53, No. 2. – P. 181-184.
7. *Askari M., Kaabi H., Kaviani Y. S.* A switched T-attenuator using 0.18 μm CMOS optimized switches for DC-20 GHz // *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. – 2015. – Vol. 69, No. 12. – P. 1760-1765.
8. *Mil'shtein S., Liessner C.* High speed switch using pairs of pHEMTs with shifted gates // *Microelectronics journal*. – 2005. – Vol. 36, No. 3-6. – P. 316-318.
9. *Mun J.-K., Oh J.-H., Sung H.-K. [et al.]* Effects of doping concentration ratio on electrical characterization in pseudomorphic HEMT-based MMIC switches for ICT system // *Solid-State Electronics*. – 2015. – Vol. 114. – P. 121-130.
10. *Рындин Е.А., Хасан А.-С. А.А.* Схемотехническая модель быстродействующего интегрального коммутатора с управляемой передислокацией максимума плотности электронов в туннельно-связанных квантовых областях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 4 (189). – С. 178-188.
11. *Абрамов И.И.* Основы моделирования элементов микро-и наноэлектроники // *Book Основы моделирования элементов микро-и наноэлектроники / Editor LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2016.*
12. *Garber G.Z.* Estimation of the accuracy of the microwave FET equivalent circuit using the quasi-hydrodynamic model of electron transport // *Solid-State Electronics*. – 2015. – Vol. 103. – P. 115-121.
13. *Palankovski V., Quay R.* Analysis and simulation of heterostructure devices. – Springer Science & Business Media, 2004.
14. *Alim M.A., Rezazadeh A A., Gaquiere C.* Multibias and thermal behavior of microwave GaN and GaAs based HEMTs // *Solid-State Electronics*. – 2016. – Vol. 126. – P. 67-74.
15. *Kalfass I., Schumacher H., Brazil T.J.* A unified approach to charge-conservative capacitance modelling in HEMTs // *IEEE microwave and wireless components letters*. – 2006. – Vol. 16, No. 12. – P. 678-680.
16. *Khandelwal S., Yigletu F., Iñiguez B. [et al.]* A charge-based capacitance model for AlGaAs/GaAs HEMTs // *Solid-State Electronics*. – 2013. – Vol. 82. – P. 38-40.
17. *Ward D.E., Dutton R.W.* A charge-oriented model for MOS transistor capacitances // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. – 1978. – Vol. 13, No. 5. – P. 703-708.
18. *Agnihotri S., Ghosh S., Dasgupta A. [et al.]* A surface potential based model for GaN HEMTs // *Microelectronics and Electronics (PrimeAsia), 2013 IEEE Asia Pacific Conference on Post-graduate Research in – IEEE, 2013.* – P. 175-179.
19. *Pozela J.* Physics of high-speed transistors. – Springer Science & Business Media, 2013.

20. Khandelwal S., Chauhan Y.S., Fjeldly T.A. Analytical modeling of surface-potential and intrinsic charges in AlGaIn/GaN HEMT devices // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2012. – Vol. 59, No. 10. – P. 2856-2860.

REFERENCES

1. Del Alamo J.A. Nanometre-scale electronics with III–V compound semiconductors, *Nature*, 2011, Vol. 479, No. 7373, pp. 317.
2. Chung J.W., Hoke W.E., Chumbes E.M. [et al.] AlGaIn/GaN HEMT With 300-GHz f_{max} , *IEEE Electron Device Letters*, 2010, Vol. 31, No. 3, pp. 195-197.
3. Alabaf M., Saghai H.R. Room temperature HEMT detector in 0.1–1 THz, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, Vol. 130, pp. 407-412.
4. Lenka T., Panda A. Characteristics study of 2DEG transport properties of AlGaIn/GaN and AlGaAs/GaAs-based HEMT, *Semiconductors*, 2011, Vol. 45, No. 5, pp. 650-656.
5. Palankovski V., Quay R., Selberherr S. Industrial application of heterostructure device simulation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2001, Vol. 36, No. 9, pp. 1365-1370.
6. Chiu H.-C., Fu J. S., Chen C.-W. RF performance of GaAs pHEMT switches with various upper/lower δ -doped ratio designs, *Solid-State Electronics*, 2009, Vol. 53, No. 2, pp. 181-184.
7. Askari M., Kaabi H., Kaviani Y. S. A switched T-attenuator using 0.18 μm CMOS optimized switches for DC-20 GHz, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2015, Vol. 69, No. 12, pp. 1760-1765.
8. Mil'shtein S., Liessner C. High speed switch using pairs of pHEMTs with shifted gates, *Microelectronics journal*, 2005, Vol. 36, No. 3-6, pp. 316-318.
9. Mun J.-K., Oh J.-H., Sung H.-K. [et al.] Effects of doping concentration ratio on electrical characterization in pseudomorphic HEMT-based MMIC switches for ICT system, *Solid-State Electronics*, 2015, Vol. 114, pp. 121-130.
10. Ryndin Ye.A., Al'-Saman A.A. Skhemotekhnicheskaya model' bystrodeystvuyushchego integral'nogo kommutatora s upravlyaemoy peredislotsiyei maksimuma plotnosti elektronov v tunnel'no-svyazannykh kvantovykh oblastyakh [Schematic model of high-speed integrated switch with managed relocation of the high density of electrons in tunnel-coupled quantum regions], *Izvestiya YFU. Tekhnicheskiye nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2017, No. 4 (189), pp. 178-188.
11. Abramov I.I. Osnovy modelirovaniya elementov mikro-i nanoelektroniki [Basics of modeling elements of micro-and nanoelectronics], *Kniga Osnovy modelirovaniya elementov mikro-i nanoelektroniki* [Book Basics of modeling elements of micro-and nanoelectronics], LAMBERT Academic Publishing, Germaniya, 2016.
12. Garber G.Z. Estimation of the accuracy of the microwave FET equivalent circuit using the quasi-hydrodynamic model of electron transport, *Solid-State Electronics*, 2015, Vol. 103, pp. 115-121.
13. Palankovski V., Quay R. Analysis and simulation of heterostructure devices. Springer Science & Business Media, 2004.
14. Alim M.A., Rezazadeh A A., Gaquiere C. Multibias and thermal behavior of microwave GaN and GaAs based HEMTs, *Solid-State Electronics*, 2016, Vol. 126, pp. 67-74.
15. Kallfass I., Schumacher H., Brazil T.J. A unified approach to charge-conservative capacitance modelling in HEMTs, *IEEE microwave and wireless components letters*, 2006, Vol. 16, No. 12, pp. 678-680.
16. Khandelwal S., Yigletu F., Iñiguez B. [et al.] A charge-based capacitance model for AlGaAs/GaAs HEMTs, *Solid-State Electronics*, 2013, Vol. 82, pp. 38-40.
17. Ward D.E., Dutton R.W. A charge-oriented model for MOS transistor capacitances, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1978, Vol. 13, No. 5, pp. 703-708.
18. Agnihotri S., Ghosh S., Dasgupta A. [et al.] A surface potential based model for GaN HEMTs, *Microelectronics and Electronics (PrimeAsia)*, 2013 *IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in – IEEE, 2013*, pp. 175-179.
19. Pozela J. Physics of high-speed transistors. Springer Science & Business Media, 2013.
20. Khandelwal S., Chauhan Y.S., Fjeldly T.A. Analytical modeling of surface-potential and intrinsic charges in AlGaIn/GaN HEMT devices, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, Vol. 59, No. 10, pp. 2856-2860.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.Е. Лысенко.

Рындин Евгений Адальбертович – Южный федеральный университет; e-mail: earyndin@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634361374; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Аль-Саман Амгад Али Хасан – email: amgadalsaman1989@gmail.com; аспирант.

Ryndin Evgeniy Adalbertovich – Southern Federal University; email: earyndin@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634361374; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; professor.

Al-Saman Amgad Ali Hasan – e-mail: amgadalsaman1989@gmail.com; postgraduate student.

УДК 51–74

DOI 10.23683/2311-3103-2018-2-94-104

М.Н. Григорьев, Н.К. Плуготаренко, Т.А. Бедная

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕГИРОВАННЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК КРЕМНИЙ – УГЛЕРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ*

Проведено моделирование процесса роста легированных кремний – углеродных пленок. В основу моделирования была положена модель образования структуры тонких пленок кремний - углеродных соединений фрактальной природы. Для моделирования исследуемых структур использовались: метод Монте-Карло, алгоритм Ванга–Ландау, диффузионно-лимитируемая модель Виттена-Сэндера, модель «кластер-кластерной» агрегации, метод Хошена-Копельмана для определения характеристик перколяционного кластера. Метод Монте – Карло применялся для реализации процесса случайного блуждания, необходимого для образования структуры полученных фракталов из кремний – углеродных соединений. В процессе моделирования также учитывался pH среды. Моделирование структуры проводилось в программной среде MatLab. Используя стандартные средства MatLab, был создан удобный интерфейс для ввода необходимых данных и отображения получаемой структуры, легированных кремний – углеродных пленок. С помощью созданной программы в MatLab были получены структуры с различной размерностью подложки, различным числом частиц в исходной матрице и различным числом частиц легирующего компонента. Основываясь на алгоритме Хошена-Копельмана, был определен момент возникновения перколяционного перехода и установлен порог протекания. Установлена зависимость структуры фрактальных кластеров и зависимость наступления перколяции от pH среды. Выявлено, что при одном и том же количестве частиц фрактальная размерность кластеров больше в идеальных условиях, чем у фрактальных структур полученных моделированием с учетом фактора pH. Определено, что концентрация легирующего компонента 0,2 мольных % достаточна для образования перколяционного кластера. Полученные с помощью моделирования данные можно использовать при проведении процессов легирования кремний – углеродных пленок.

Кремний – углеродные пленки; метод Монте–Карло; нанокмозиты; фрактальные кластеры.

M.N. Grigoryev, N.K. Plugotarenko, T.A. Bednaya

MODELING THE STRUCTURE OF THE SILICON-CARBON COMPOUNDS DOPED THIN FILMS

The simulation of the growth process of doped silicon-carbon films was described herein. Existing models of the structure of thin films of silicon-carbon compounds are considered. Modeling was based on a fractal clusters model of silicon-carbon compounds. Monte Carlo method, the algorithm Wang-Landau model, the diffusion-limited Witten-Sander model, the "cluster-cluster" aggregation mod-

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, Соглашение №14.575.21.0126 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57517X0126).