

УДК 621.382

Н.Н. Ворсин¹, А.А. Гладышук², Н.П. Тарасюк³, С.В. Чугунов⁴¹канд. физ.-мат. наук, доц. каф. физики

Брестского государственного технического университета

²канд. физ.-мат. наук, проф. каф. физики

Брестского государственного технического университета

³ст. преподаватель каф. физики

Брестского государственного технического университета

⁴ст. преподаватель каф. физики

Брестского государственного технического университета

e-mail: vorsin@hotmail.com

АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ВАХ ХЕМТ НА ОСНОВЕ GaN

Получены аналитические соотношения для вольтамперных характеристик гетеропереходных транзисторов на основе нитрида кремния. Формулы отражают зависимость ВАХ от толщины барьерного слоя AlGaIn и мольной доли алюминия в нем. Проведено сравнение формульных ВАХ с полученными на основе численного моделирования.

В последние десятилетия активно разрабатываются гетероструктурные полевые транзисторы AlGaIn/GaN, позволяющие получить высокие значения выходной мощности, рабочей частоты и температурного диапазона функционирования. Для их анализа разработаны программные пакеты численного моделирования, такие как «Synopsys», «Silvaco», «FETIS» и др.

Использование данных средств в принципе позволяет решить любую задачу вычисления характеристик прибора, однако при этом теряется параметрическая общность решения. При наличии нескольких параметров необходим многократный пересчет для различного их сочетания [1], что затрудняет понимание физической сути результатов. В этой связи, на наш взгляд, не утратил актуальности классический подход к анализу процессов, основанный на допустимых упрощениях и аппроксимациях.

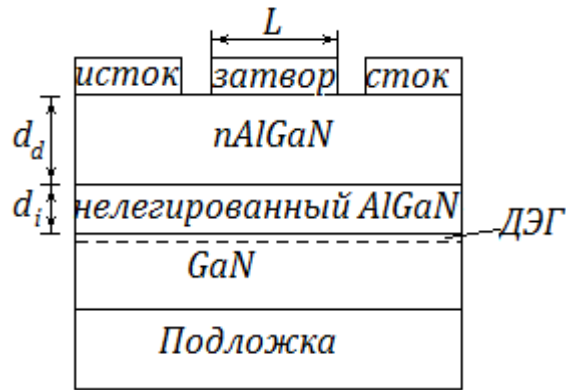
Ниже приводятся результаты такого анализа, проведенного в ходе исследований ХЕМТ на основе GaN. Численное моделирование с помощью программного комплекса FETIS подтверждают допустимость сделанных упрощений, относительные погрешности формульных расчетов не превышают нескольких процентов.

На рисунке 1 показана использованная модель транзистора с минимальным количеством выделенных слоев, которые представляют собой (сверху – вниз) металл, n-AlGaIn, нелегированный AlGaIn, нелегированный GaN с двумерным электронным газом (ДЭГ), который образуется в гетеропереходе AlGaIn-GaN.

Такая упрощенная модель не содержит барьера AlN между каналным GaN и барьерным AlGaIn-слоями, не учитывает влияние множества переходных слоев реальных ХЕМТ. Однако для качественного рассмотрения данными тонкостями пока пренебрегаем.

Плотность связанных состояний электронов в квантовой яме, содержащей ДЭГ, согласно [1], определяется выражением

$$n_{bound}(z) = \frac{m_e kT}{\pi \hbar^2} \sum_v |\psi_v(z)|^2 \ln \left[1 + \exp \left(\frac{F_n - E_v}{kT} \right) \right]. \quad (1)$$



**Рисунок 1. – Модель транзистора
с минимальным количеством
выделенных слоев**

В нем k , h , m_e – постоянная Больцмана, Планка, эффективная масса электрона, $\psi_v(z)$ – волновая функция электронов в яме, определяемая при решении уравнения Шредингера, F_n – энергия Ферми. В нормальных условиях, при температуре около 300 К можно полагать, что только два нижних уровня находятся в зоне проводимости GaN, поэтому концентрация электронов ДЭГ выразится из (1) в следующем виде:

$$n_s = DkT \cdot \ln \left(\left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_1}{kT} \right) \right) \cdot \left(1 + \exp \left(\frac{E_F - E_2}{kT} \right) \right) \right), \quad (2)$$

где D – постоянный коэффициент, E_F – уровень Ферми GaN относительно дна зоны проводимости.

Влияние затвора на концентрацию электронов можно описать с использованием такого параметра, как пороговое напряжение:

$$n_s(m) = \frac{\varepsilon(m)}{q(d_d + d_i)} (U_g - U_{\text{пор}} - \frac{E_F}{q}). \quad (3)$$

Здесь q – заряд электрона, ε и $d = d_d + d_i$ – диэлектрическая проницаемость и полная толщина слоя AlGaN соответственно; $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение НЕМТ, которое определяется формулой:

$$U_{\text{пор}} = \varphi_b - \Delta E_c - \frac{qN_s d_{\text{nAlGaN}}^2}{2\varepsilon_{\text{nAlGaN}}} - \sigma \frac{d_{\text{AlGaN}}}{\varepsilon_{\text{AlGaN}}}, \quad (4)$$

в которой φ_b – эффективная высота барьера Шоттки на переходе металл – nAlGaN, ΔE_c – величина разрыва зоны проводимости на границе раздела между AlGaN и слоями GaN. Слагаемое $\frac{qN_s d_{\text{AlGaN}}^2}{2\varepsilon_{\text{AlGaN}}}$ представляет собой концентрацию легирования в слое n – AlGaN, а σ – плотность зарядов поляризации на границе раздела слоев.

Уравнения (2) и (3) образуют систему уравнений, решение которой дает концентрацию ДЭГ, образующего канал транзистора:

$$n_s(m) = \frac{2e^2 m_e d}{2e^2 m_e d + \varepsilon_m \pi \hbar^2} \left[(U_g - U_{\text{пор}}) \frac{\varepsilon_m}{ed} + \frac{m_e}{\pi \hbar^2} (E_1 + E_2) \right] - \frac{m_e}{\pi \hbar^2} (E_1 + E_2), \quad (5)$$

где E_1 и E_2 – энергии уровней.

Формулы (4), (5) позволяют оценить величину $U_{\text{пор}}$ и концентрацию электронов в канале транзистора при $U_g > U_{\text{пор}}$ при различных значениях толщины слоев AlGaIn. Если $U_g < U_{\text{пор}}$, концентрация свободных электронов считается нулевой. На рисунке 2 показаны графики зависимости n_s от U_g для различных значений толщины легированного слоя AlGaIn.

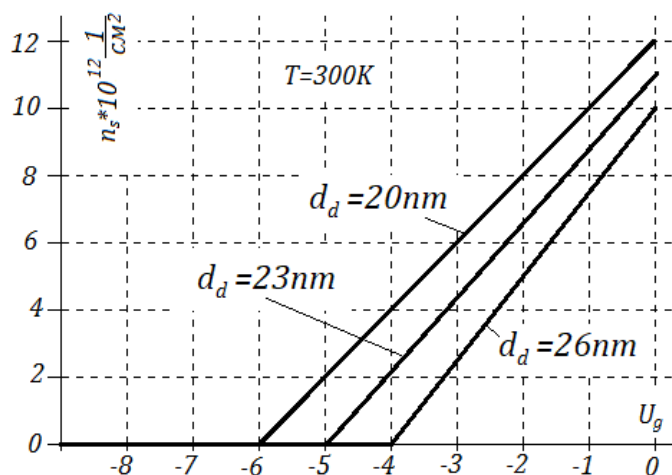


Рисунок 2. – Графики зависимости n_s от U_g для различных значений толщины легированного слоя AlGaIn

Видно, что при уменьшении толщины d_d – легированного слоя AlGaIn – концентрация носителей в ДЭГ возрастает. Пороговое напряжение транзистора смещается в сторону увеличения в абсолютном значении с уменьшением d_d . Увеличение электронной плотности связано с усилением эффекта пьезоэлектрической и спонтанной поляризации.

Наклон графиков n_s - U_g выражает емкость между затвором и каналом, которая непосредственно связана с распределением потенциала между затвором и 2-DEG. Для $d_d = 20 \text{ нм}$ наклон составляет $2,1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ В}^{-1}$, тогда как для $d_d = 26 \text{ нм}$ наклон составляет $1,4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ В}^{-1}$. Это показывает, что высокие значения ширины барьера благоприятны для достижения большей электронной плотности и получения меньших значений емкости затвора.

Другим варьируемым параметром гетероструктуры типа AlGaIn/GaN является содержание в ней Al. Диапазон возможных вариаций не особенно широк. Обычно мольная доля Al изменяется от 0,15 до 0,35, и влияет на положение энергетических уровней E_1 , E_2 , входящих в уравнения (2, 5).

На рисунке 3 показаны графики зависимости концентрации ДЭГ от напряжения на затворе при различных величинах доли Al.

Из графиков видно, что увеличение молей Al в AlGaIn/GaN HEMT увеличивает плотность электронов, а также влияет на величину порогового напряжения, которое увеличивается по абсолютной величине. Однако наклон характеристик n_s - $=F(U_g)$ и, как следствие – затворная емкость, при этом почти не изменяются.

Вольтамперные характеристики.

При численном моделировании как правило имеется возможность выбора полевой зависимости подвижности электронов в канале. Для короткого GaN-канала, имеющего высокую скорость насыщения, такая возможность является излишней.

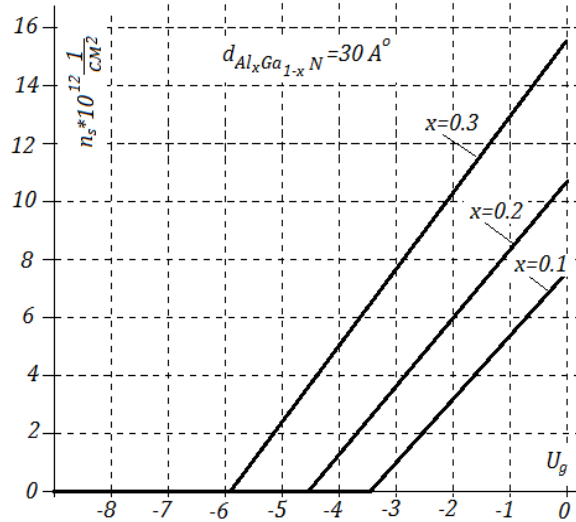


Рисунок 3. – Графики зависимости концентрации ДЭГ от напряжения на затворе при различных величинах доли Al

Полагая подвижность μ константой, можно записать для плотности тока в сечении x -канала очевидную формулу

$$j = qn_s(x)\mu \frac{dU}{dx}, \quad (6)$$

в которой ось X направлена вдоль канала от истока к стоку. Плотность тока должна быть одинаковой во всех сечениях канала (не зависит от x), а концентрация носителей управляется напряжением затвора согласно формуле (5), в которую вместо U_g необходимо подставить $U_g - U(x)$. На границах канала, примыкающих к истоку и стоку, координата x равна соответственно 0 и L , где L – длина канала согласно рисунку 1. При этом $U(0) = 0$, $U(L) = U_d$.

Вычисление тока стока приходится делать отдельно для двух участков ВАХ. На первом участке концентрация носителей на протяжении всего канала не равна нулю, т.е. $U_g - U_d > U_{пор}$. При этом плотность тока увеличивается с ростом стокового напряжения и выражается следующей формулой:

$$j_d = \frac{\mu\beta e}{L} \left(U_g - U_{пор} - \frac{U_d}{2} \right) U_d. \quad (7)$$

Согласно этому выражению, плотность тока в канале достигает максимума при $U_d = U_g - U_{пор}$. Для дальнейшего увеличения стокового напряжения формула (7) будет неверна, поскольку ток канала достиг насыщения и далее не зависит от напряжения стока.

Величина стокового напряжения, при котором достигается насыщение стокового тока, можно оценить по исключительно простой формуле

$$U_{днас} = U_g - U_{пор}. \quad (8)$$

Не менее простая формула получается для плотности тока насыщения:

$$j_{\text{нас}} = \frac{\mu\beta e(U_g - U_{\text{пор}})}{2L}. \quad (9)$$

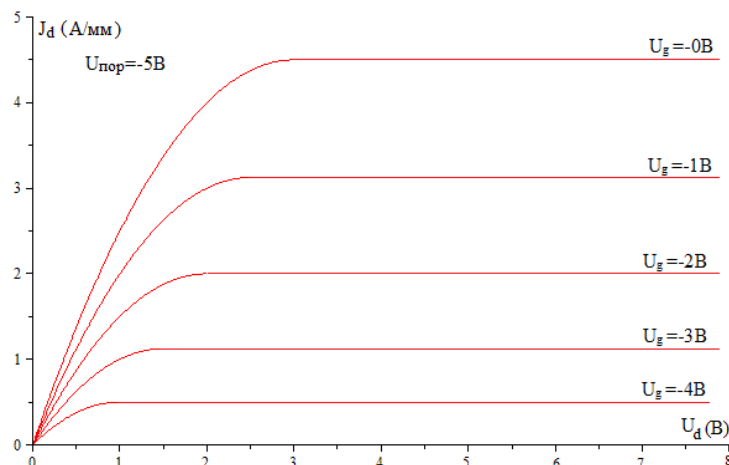


Рисунок 4. – ВАХ идеализированного транзистора

На рисунке 4 приведены ВАХ идеализированного транзистора, построенные по формулам (3–9) для следующих параметров: толщина барьерного слоя $d_d = 23\text{ нм}$, мольная доля алюминия $x = 0.2$. Величина порогового напряжения при таких параметрах составляет -5 В .

Для сравнения на рисунке 5 приведено семейство ВАХ транзистора с такими же исходными параметрами, рассчитанное с помощью программного комплекса численного моделирования GaN транзисторов «Фетис» [3]. Видно, что различие формы и размеров ВАХ, рассчитанных аналитическим и численным методами, невелико. Главным образом заметные различия наблюдаются только в области, близкой к запирающему транзистора, где упрощенная аналитическая модель не учитывает такие эффекты, как вклад в концентрацию несвязанных состояний, наличие свободной поверхности пленки и др. Тем не менее простота аналитической модели и возможность быстрой оценки параметров GaN транзисторов делают ее небезынтесной.

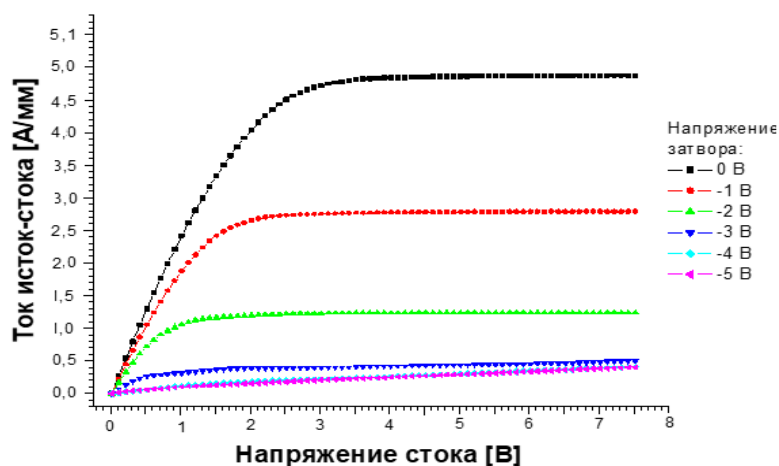


Рисунок 5. – Семейство ВАХ транзистора, рассчитанное с помощью программного комплекса численного моделирования GaN транзисторов «Фетис»

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация параметров НЕМТ-гетероструктур GaN/AlN/AlGaN для СВЧ транзисторов с помощью численного моделирования / В. Г. Тихомиров [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, вып. 2. – С. 245–249.
2. Polarization effects, surface states, and the source of electrons in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors / J. P. Ibbetson [et al.] // Applied Physics Letters. – 10 July 2000. – Vol. 77, № 2. – P. 250–253.
3. STR Group – Modeling of crystal growth and devices [Электронный ресурс] // SimuLED software for LED and laser diode design and optimization, Field Effect Transistor Integrated Simulator (FETIS)-package for simulation of group-III nitride based high electron mobility transistors (HEMTs).

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 20.04.2018

Vorsin N.N., Gladyschuk A.A., Tarasiuk N.P., Chugunov S.V. Analytical Relations for the IVC of HEMT Based on Gan

Analytic relationships are obtained for the current-voltage characteristics of heterojunction transistors based on silicon nitride. The formulas reflect the dependence of the I-V characteristic on the thickness of the barrier layer of Al-GaN and the molar fraction of aluminum in it. A comparison of the formula I-V characteristics with those obtained on the basis of numerical simulation is made.