

УДК

# Исследование транзисторной GaAs-гетероструктуры полевых транзисторов мм-диапазона длин волн на ее основе

С.Н. Карпов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «ИСТОК» имени А.И. Шокина»

**Аннотация:** в данной работе представлены результаты исследования GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов мм-диапазона длин волн АО «НПП «Исток» им. Шокина». Предложена одномерная модель для оценки характеристик гетероструктур и вольт-амперных характеристик полевых транзисторов. Проведена апробация результатов моделирования и получено хорошее согласие с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** GaAs-гетероструктура, поверхностная плотность, подвижность электронов, напряжение перекрытия

## 1. Введение

В настоящее время большинство современных полевых транзисторов разрабатывается на основе GaN- и GaAs-гетероструктур. Увеличение удельной мощности, коэффициентов усиления и рабочих частот транзисторов СВЧ-диапазона длин волн является актуальной задачей. Существующие на данный момент САПР транзисторных гетероструктур не позволяют учитывать при моделировании их электрофизических свойств ряд квантовых явлений, что приводит к снижению точности прогнозирования характеристик разрабатываемых гетероструктур. В связи с этим разработка математических моделей прогнозирования характеристик гетероструктур и полевых транзисторов на их основе является актуальной задачей. В работе будут рассмотрены характеристики GaAs-гетероструктуры и полевых транзисторов на ее основе.

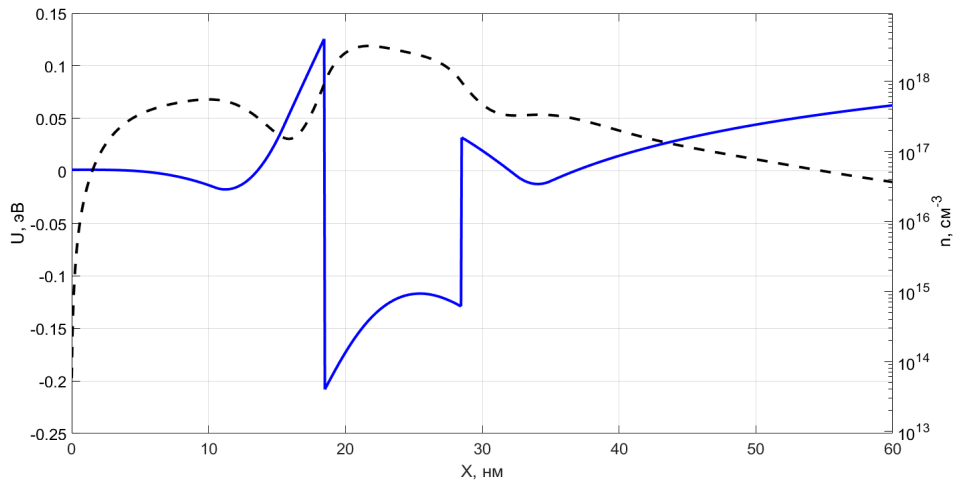
## 2. Теоретический расчет

Основной математической модели для расчета электрофизических характеристик транзисторных гетероструктур является самосогласованная система уравнений Шредингера-Пуассона:

$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{m(x)} \frac{\partial}{\partial x} \psi_i(x) \right) + U(x) \psi_i(x) = E_i \psi_i(x) \\ \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon(x) \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x) \right) = -e(N_d(x) - n(x)) \end{cases}, \quad (1)$$

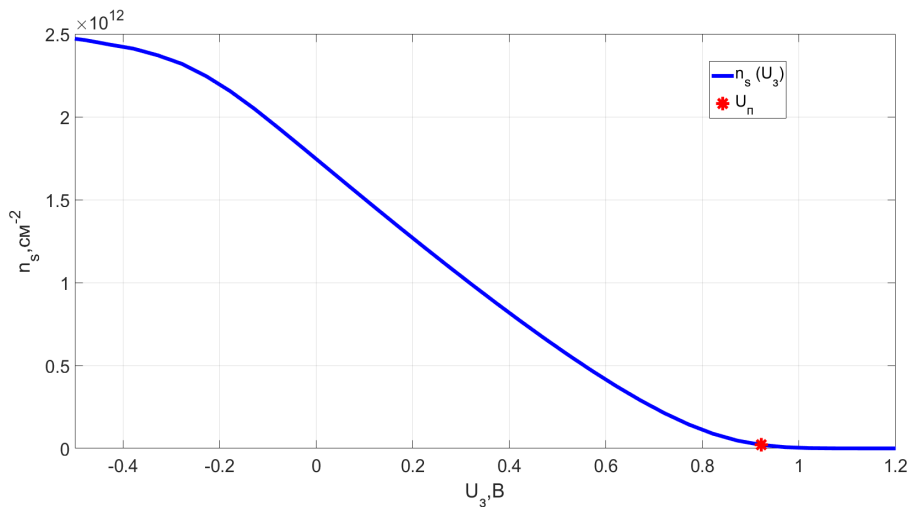
где  $m(x)$  – эффективная масса электронов в рассматриваемой гетероструктуре, кг;  $\psi_i(x)$  – волновая функция  $i$ -ого энергетического уровня в структуре,  $m^{-1/2}$ ;  $E_i$  – энергия  $i$ -го уровня, Дж;  $\varphi(x)$  – потенциал в структуре, В;  $U(x) = -e\varphi(x) + E_c(x)$  – профиль потенциальной энергии структуры, учитывающий разрыв зон  $E_c(x)$ , Дж;  $\varepsilon(x)$  – диэлектрическая проницаемость структуры;  $N_d(x)$  – концентрация доноров в структуре,  $m^{-3}$ ;  $n(x, \varphi)$  – концентрация свободных носителей заряда (электронов) в структуре,  $m^{-3}$ ;  $\hbar = 1.0546 \cdot 10^{-34}$  – постоянная Планка, Дж/с;  $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  – элементарный заряд, Кл;  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м.

Зонная диаграмма и профиль носителей заряда исследуемой структуры при нулевом смещении на затворе представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Зонная диаграмма (сплошная линия) и концентрация свободных носителей (пунктирная линия) в гетероструктуре.

На рисунке 2 продемонстрированы результаты моделирования зависимости поверхностной концентрации электронов в канале гетероструктуры при различных напряжениях на затворе.



**Рисунок 2.** Поверхностная концентрация носителей заряда в канале гетероструктуры.

Для открытого затвора оценка поверхностной плотности электронов в канале составила  $n_s = 2.37 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Для данной гетероструктуры была проведена оценка напряжения перекрытия  $V_{\text{п}}$ . Критерием перекрытия являлось снижение  $n_s$  относительно открытого затвора в 100 раз:

$$V_{\text{п}} = V \left( \frac{n_{s0}}{n_s} = 100 \right). \quad (2)$$

По данному критерию для данной гетероструктуры  $V_{\text{п}} \approx 0,9 \text{ В}$ , что находится в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Оценка эффективной подвижности носителей заряда в гетероструктуре проводилась по модели [1]:

$$\mu_{eff} = \frac{\int_0^{x_{end}} \mu(x)n(x)dx}{\int_0^{x_{end}} n(x)dx}, \quad (3)$$

где  $\mu(x)$  – подвижность электронов в гетероструктуре,  $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ .

Результаты моделирования эффективной подвижности носителей заряда при различных  $V_3$  представлены на рисунке 3. Можно выделить линейную область зависимости при  $V_3 = -0.1 \div 0.7$  В, в которой эффективная подвижность совпадает с подвижностью канала.

Кроме оценки  $V_{\Pi}$  по выражению (2), имеется возможность оценить  $V_{\Pi}$  по значению подвижности. В данном случае критерием является:

$$\mu_{eff}(V_3) = \mu_{buffer}, \quad (4)$$

т.е. такое  $V_3$ , при котором основной вклад в подвижность будет вносить буферный слой, иными словами, при таком  $V_3$  свободные носители заряда будут локализованы только в буфере. По такой оценке,  $V_{\Pi} \approx 1.1$  В.

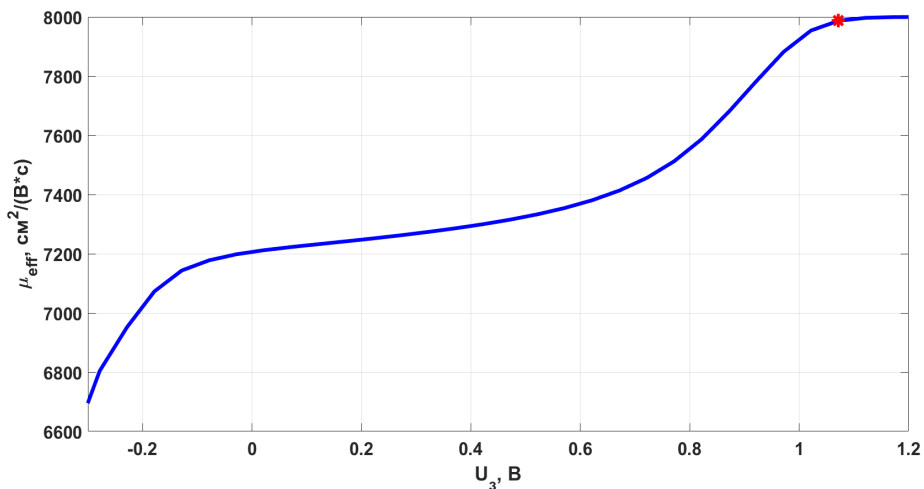


Рисунок 3. Эффективная подвижность электронов в гетероструктуре.

Расчет поверхностного сопротивления канала проводился по формуле [2]:

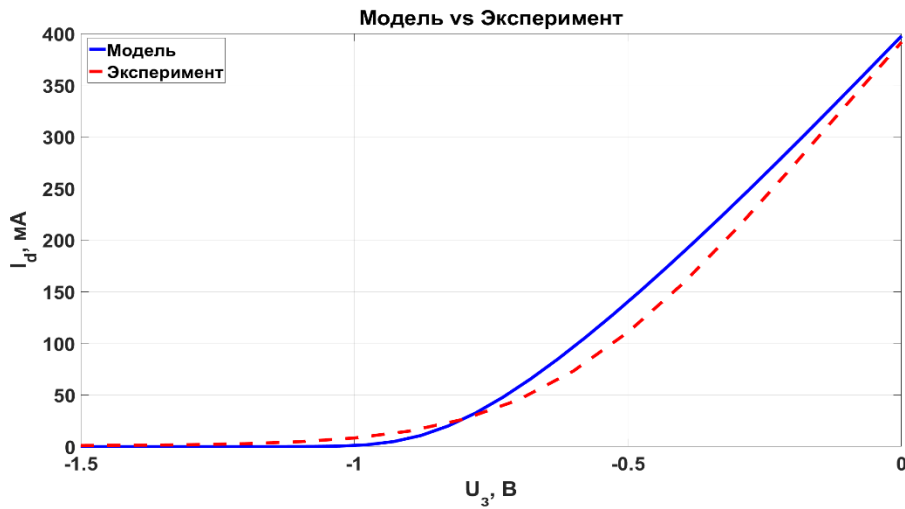
$$R_{sh}(V_3) = \frac{1}{e \cdot n_s(V_3) \cdot \mu_{eff}(V_3)}, \quad (5)$$

Оценка тока насыщения проводилась по следующей формуле:

$$I_{нас} = q n_s v_{нас}, \quad (6)$$

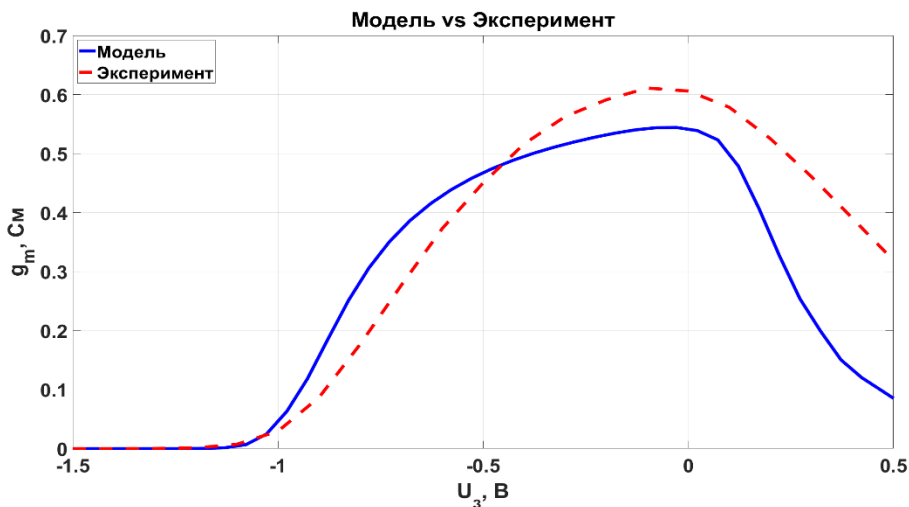
где  $v_{нас} = \left(1.23 \cdot \frac{X_{In}}{0.53} + 0.8\right) 10^7 \frac{\text{см}}{\text{с}}$  – скорость насыщения электронов в канале,  $X_{In}$  – мольная доля индия в канале [3,4].

Зависимость тока насыщения от напряжения на затворе и сравнение с экспериментальными данными для транзистора с заданной шириной затвора представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Ток насыщения в полевом транзисторе (красная пунктирная линия) и теоретический расчет (синяя сплошная линия)

Зависимость крутизны передаточной характеристики от напряжения на затворе представлена и сравнение экспериментальных данных для транзистора с заданной шириной затвора представлены на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Ток насыщения в полевом транзисторе (красная пунктирная линия) и теоретический расчет (синяя сплошная линия)

### 3. Заключение

Разработанные методики в первом приближении позволяют оценить на этапе проектирования ток насыщения и крутизну полевых транзисторов, разрабатываемых на основе GaAs-гетероструктур. Проведенные расчеты крутизны и тока насыщения при заданной ширине затвора серийных образцов транзисторов мм-диапазона длин волн оказались в хорошем согласии с экспериментальными данными. Предложенная модель может быть использована для предсказания поведения характеристик проектируемых гетероструктур и полевых транзисторов на их основе.

### Список литературы

1. V.V.Vainberg, A.S. Pylypchuk, N.V. Baidus, B.N. Zvonkov. Electron mobility in the GaAs/InGaAs/GaAs quantum wells // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2013. – Vol. 16. – No. 2. – P. 152 – 161.
2. Lenka- T.R. Lenka, A.K. Panda. Characteristics Study of 2DEG Transport Properties of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> and AlGaAs/GaAs-based HEMT // *Semiconductors*. – 2011. – Vol. 45. – No. 5. – PP. 650-656.
3. S.Qu, X. Wang, H.Xiao, C. Wang, C. Wang, L. Jiang, C. Feng, H. Chen, H. Yin, E. Peng, H. Kang, Z. Wang, X. Hou. Analysis of transconductance characteristic of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs with graded AlGa<sub>N</sub> layer // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 6. – P.20101
4. R. Gupta, M.El. Nokali. A model for dual-channel high electron mobility transistors // *Solid-State Electronics*. – 1995. – Vol. 38. – No.1. – pp. 51-57