

# Горячие электроны в гетероструктурах на основе GaN и GaAs

С.Н. Карпов, С.А. Богданов, А.Б. Пашковский

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** в данной работе представлены результаты расчета всплеска дрейфовой скорости в гетероструктурах на основе GaN и GaAs на основе гидродинамической модели с феноменологическими временами релаксации электронов по импульсу и энергии. Проведено сравнение с величинами всплеска дрейфовой скорости в объемных материалах GaN и GaAs.

**Ключевые слова:** всплеск дрейфовой скорости, горячие электроны, гетероструктура

## 1. Введение

Технологии, основанные на применении материалов группы III-N, ввиду их многообещающих характеристик, привлекли к себе огромное внимание со стороны научного сообщества. Ежегодно публикуются работы по методам улучшения линейности нитрид-галлиевых транзисторов [1], мощности [2], крутизны [3], а также по уменьшению длин затворов для работы в мм-диапазоне длин волн [4,5]. Продемонстрированы рекордные значения удельной мощности нитрид-галлиевого транзистора, постоянной в различных частотных диапазонах [6]. Сравнение GaN-транзисторов с мощными GaAs DpHEMT-транзисторами показывает, что при одинаковых длинах коротких затворов коэффициент усиления GaN-транзисторов не уступает, а в некоторых случаях оказывается выше, чем у GaAs- транзисторов. Также стоит отметить, что поверхностная концентрация носителей заряда нелегированных GaN-структур достигает величин порядка  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> [7], причем использование композиционно-градиентных AlGaN – барьеров позволяет увеличить эту величину [1]. В то же время анализ динамики горячих электронов в объемном арсениде галлия показывают, что он все равно является более перспективным материалом, чем нитрид галлия, для применения в мм-диапазоне длин волн [8,9]. Однако, в настоящее время транзисторы изготавливаются на основе гетероструктур, при этом имеет место существенное изменение динамики горячих электронов в сравнении с объемным материалом. В случае GaAs-структур это объясняется сильным влиянием поперечного пространственного переноса электронов между слоями гетероструктуры. Таким образом, представляет интерес сравнить всплеск дрейфовой скорости электронов в гетероструктурах современных полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн изготовленных на основе разных материалов.

## 2. Математическая модель

Расчёты дрейфовой скорости в продольном направлении проводились по модели [10]. Транспорт горячих электронов описывался на основе гидродинамической модели с феноменологическими временами релаксации электронов по импульсу и энергии.

Предварительно, для описания поведения электронов в поперечном направлении при разных температурах электронного газа было получено решение самосогласованной системы 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,  $\psi_i(x)$  –  $i$ -ая волновая функция в структуре;  $E_i$  – собственные значения энергии волновой функции;  $\varphi(x)$  – потенциал в структуре,  $U(x) = -e\varphi(x) + E_c(x)$  – профиль потенциальной энергии структуры, учитывающий разрыв зон  $E_c(x)$ ,  $\varepsilon(x)$  – диэлектрическая проницаемость структуры;  $N_d(x)$  – концентрация доноров в структуре,  $n(x, \varphi)$  – концентрация носителей заряда (электронов) в структуре,  $\hbar$  – постоянная Планка;  $e$  – элементарный заряд,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Система решалась с помощью метода конечных разностей (МКР).

Для нитрид-галлиевых структур учитывался поляризационный эффект:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_0 \varepsilon(x) \frac{\partial}{\partial x} \varphi(x) + P_{tot}(x) \right) = -e(N_d(x) - n(x)), \quad (2)$$

$$P_{tot} = P_{sp} + P_{pz}$$

где  $P_{tot}(x)$  – суммарная поляризация полупроводника в точке  $x$ ,  $\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$ ;  $P_{sp}$  и  $P_{pz}$  – спонтанная и пьезоэлектрические компоненты поляризации, соответственно.

В направлении параллельном поверхности структуры транспорт электронов описывается на основе феноменологической системы уравнений сохранения импульса и энергии с временами релаксации для объёмных материалов. В предположении, что частота рассеяния электронов задается в виде  $\nu = p_1 \nu_1 + p_2 \nu_2$ , где  $p_1, p_2, \nu_1, \nu_2$  – вероятности нахождения электронов и их частоты рассеяния в узкозонном слое канала и в более широкозонных слоях, обрамляющих канал:

$$m^*(\varepsilon) = m_1^*(\varepsilon) p_1 + m_2^*(\varepsilon) p_2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(m^*(\varepsilon)V)}{\partial t} = q \left( E - \frac{m^*(\varepsilon)V(m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)E_{s2}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)E_{s1}(\varepsilon)p_1)}{m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)} \right) \quad (4)$$

$$V_s(E) = \frac{m_1^*(E)V_{s1}(E)m_2^*(E)V_{s2}(E)}{(m_1^*(E)p_1 + m_2^*(E)p_2)(m_1^*(E)V_{s1}(E)p_2 + m_2^*(E)V_{s2}(E)p_1)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q(EV - V_s(\varepsilon)(E_{s1}(\varepsilon)p_1 + E_{s2}(\varepsilon)p_2)) \quad (6)$$

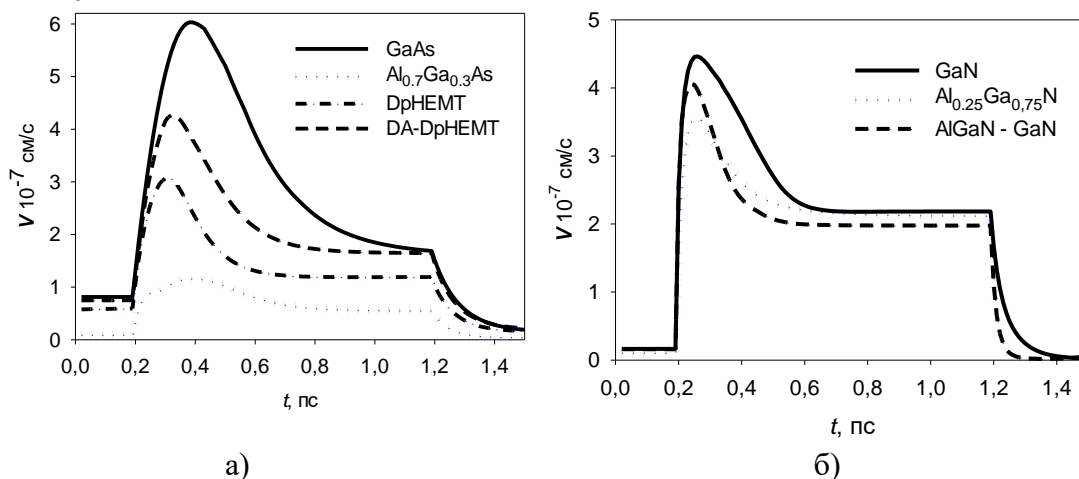
Здесь  $q, V, m^*, \varepsilon = 3kT/2$  – заряд, скорость, усредненная эффективная масса и энергия электронов соответственно,  $E$  – напряженность электрического поля,  $V_{si}(\varepsilon), E_{si}(\varepsilon)$  – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, соответствующие некоторой задаваемой энергии  $\varepsilon$ , получаемые из расчетов методом Монте-Карло статических характеристик материалов,  $p_1$  и  $p_2$  – вероятности нахождения электронов в узкозонном слое канала и в более

широкозонных слоях, обрамляющих канал, соответственно.

Для описания динамики электронов обе системы решаются самосогласованно.

### 3. Результаты расчётов

Результаты расчётов приведены на рисунке 1. Согласно рисунку 1, в GaAs-гетероструктурах поперечный пространственный перенос в разы уменьшает всплеск дрейфовой скорости электронов при их влёте в область сильного поля, что, соответственно, увеличивает время пролёта электронов под затвором. В то же время в гетероструктурах на основе GaN негативное влияние этого эффекта обычно достигает не более 20%.



**Рисунок 1.** Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени: а) структуры на основе GaAs, значения напряженности электрического поля  $E=1$  кВ/см (интервалы 0 – 0.2 пс и 1.2 – 1.5 пс) и  $E=20$  кВ/см (интервал 0.2– 1.2 пс), б) структуры на основе GaN, значения напряженности электрического поля  $E=1$  кВ/см (интервалы 0 – 0.2 пс и 1.2 – 1.5 пс)  $E=300$  кВ/см (интервал 0.2– 1.2 пс)

### 4. Заключение

Из проведенных расчётов можно сделать вывод, что в гетероструктурах, а, следовательно, и в транзисторах на основе GaN, динамика горячих электронов близка к их поведению в объёмном материале, в то время как в гетероструктурах для мощных транзисторов на основе GaAs из-за переходов между слоями по сравнению с объёмным материалом электроны движутся заметно медленней.

#### Список литературы

1. M.G. Ancona, J.P. Calame, D.J. Meyer, S. Rajan, and B.P. Downey. Compositionally Graded III-N HEMTs for Improve Linearity: A Simulation Study // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Vol. 66. – № 5. – P. 2151
2. S. Rahman, N.A. Farhana Othman, S.W. Muhamad Hatta, and N. Soin. Optimization of Graded AlInN/AlN/GaN HEMT Device Perfomance Based on Quaternaty Back Barrier for High Power Application // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – 2017. – Vol. 6. – № 12. – P. 805 – 812.
3. S. Bajaj, Z. Yang, F. Akyol, P.S. Park, Y. Zhang, A.L. Price, S. Krishnamoorthy, D.J. Meyer, and S. Rajan. Graded AlGaIn Channel Transistors for Improved Current and Power Gain Linearity // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – Vol. 99 – P. 1 – 6.
4. H. Wang, et al. Jul. 2019. [Online]. Available: [https://gems.ece.gatech.edu/PA\\_survey.html](https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html)
5. Y. Tang, et al. Ultrahigh-Speed High-Electron-Mobility Transistors With  $f_i/f_{max}$  of 454/444 GHz // IEEE Electron Device Letters. – 2015. – Vol. 36. – No. 6. – P. 549-551.

6. B. Romanczyk, S. Wienecke, M. Guidry, H. Li, E. Ahmadi, X. Zheng, S. Keller, and U.K. Mishra. Demonstration of Constant 8 W/mm Power Density at 10, 30, and 94 GHz in State-of-the-Art Millimeter-Wave N-Polar GaN MISHEMTs // IEEE Transaction on Electron Devices. – 2018. – Vol. 65. – NO. 1. – P. 45- 50.
7. T.R. Lenka and A.K. Panda. Characteristics Study of 2DEG Transport Properties of AlGaIn/GaN and AlGaAs/GaAs-based HEMT // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45. – No. 5. – P. 650 -656
8. B.E. Foutz et al. Transient Electron Transport in Wurtzite GaN, InN and AlN // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol.85. – № 11. – P. 7727-7734.
9. А.Б. Пашковский, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов, В.Г. Лапин, А.А. Капралова, И.А. Анисимов. Нелокальный дрейф электронов в полевых транзисторах на основе нитрида галлия // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. – 2014. – Вып.4(523). – С. 5- 16.
10. А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов. Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-DrHEMT // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – В. 17. – С. 103 – 110.