

# Анализ динамики электронов в гетероструктурах с двухсторонним донорно-акцепторным легированием и дополнительными потенциальными барьерами

С.А. Богданов<sup>1</sup>, А.К. Бакаров<sup>2</sup>, К.С. Журавлёв<sup>2</sup>, С.Н. Карпов<sup>1</sup>, В.Г. Лапин<sup>1</sup>, В.М. Лукашин<sup>1</sup>, А.Б. Пашковский<sup>1</sup>, И.А. Рогачёв<sup>1</sup>, Е.В. Терёшкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина»

<sup>2</sup>Институт физики полупроводников им Академика А.В. Ржанова СО РАН

**Аннотация:** Представлены первые результаты теоретического исследования гетероструктур на основе GaAs с донорно-акцепторным легированием и дополнительными потенциальными барьерами на основе AlAs. Показано, что введение дополнительных «цифровых» барьеров увеличивает всплеск дрейфовой скорости в таких структурах на 30 – 40 %. Исследован эффект локализации горячих электронов в сверхрешётке, приводящий к дополнительному росту всплеска дрейфовой скорости.

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

## 1. Введение

Анализ экспериментальных данных и теоретические оценки показывают, что дрейфовая скорость электронов под затвором полевых транзисторов на псевдоморфных гетероструктурах с двусторонним донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT) существенно больше, чем в обычных DpHEMT. Донорно – акцепторное легирование оказалось очень перспективным способом улучшения транзисторных гетероструктур. При длине затвора 0,3 мкм и ширине 0,8 мм DA-DpHEMT имеют коэффициент усиления на 3 – 4 дБ больше, чем DpHEMT [1-3]. Проведенные исследования демонстрируют, что данное направление обладает еще достаточно большими потенциальными возможностями. Всплеск дрейфовой скорости электронов при влёте их в область сильного поля в канале транзистора сильно зависит от степени локализации электронов в канале под затвором транзистора. В то же время, степень локализации электронов сильно зависит как от величин разрыва зон на границах гетероструктуры, что определяется параметрами используемой гетеропары, так и от эффективности дополнительных потенциальных барьеров, определяемой их геометрией. Для формирования дополнительных потенциальных барьеров с резкими границами необходимо увеличивать поверхностную плотность доноров в n<sup>+</sup> дельта слоях, что имеет определенные технологические ограничения, а также приводит к увеличению рассеяния электронов в канале и снижает их подвижность. В то же время, вместо однородных материалов как в спейсере между каналом и n<sup>+</sup> дельта слоем, так и в нелегированном промежутке между дельта слоем и тонким p<sup>+</sup> слоем, можно использовать структуру, состоящую из набора чередующихся двух – трех монослоев широкозонного материала (AlAs) и четырех – шести монослоев узкозонного материала (GaAs). Использование подобной структуры [4] позволило значительно (на 3 – 5 дБ) улучшить коэффициент усиления DA-DpHEMT транзисторов и при длине затвора транзистора 0,14 мкм получить усиление порядка 18 – 20 дБ на частоте 40 ГГц.

## 2. Математическая модель

Для оценки возможного эффекта от использования «цифровых» барьеров в гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и объяснения результатов [4], были проведены расчёты по модели [5]. Для описания поведения электронов в

поперечном направлении при разных температурах электронного газа решалась 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,  $\psi_i(x)$  –  $i$ -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.

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:

$$m^*(\varepsilon) = m_1^*(\varepsilon) p_1 + m_2^*(\varepsilon) p_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(m^*(\varepsilon)V)}{\partial t} = q \left( E - \frac{m^*(\varepsilon)V(m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)E_{s2}(\varepsilon)p_2 + m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)E_{s1}(\varepsilon)p_1)}{m_1^*(\varepsilon)V_{s1}(\varepsilon)m_2^*(\varepsilon)V_{s2}(\varepsilon)} \right) \quad (3)$$

$$V_s(E) = \frac{m_1^*(E)V_{s1}(E)m_2^*(E)V_{s2}(E)}{(m_1^*(E)p_1 + m_2^*(E)p_2)(m_1^*(E)V_{s1}(E)p_2 + m_2^*(E)V_{s2}(E)p_1)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = q(EV - V_s(\varepsilon)(E_{s1}(\varepsilon)p_1 + E_{s2}(\varepsilon)p_2)) \quad (5)$$

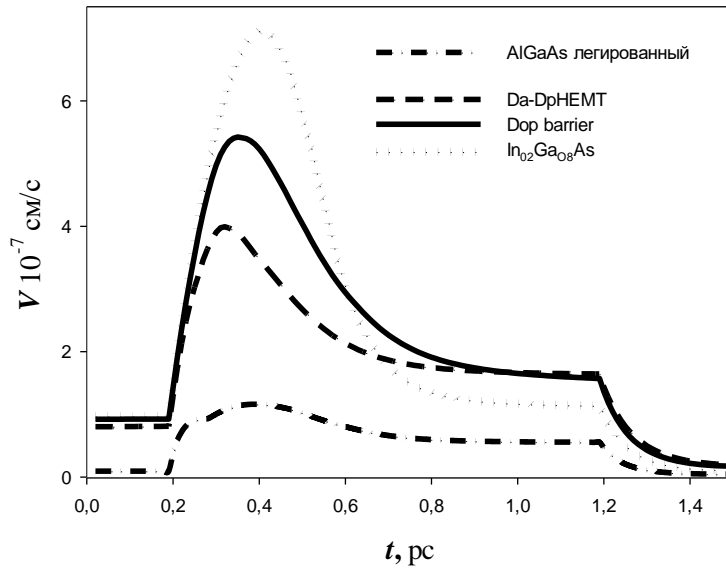
Здесь  $q, V, m^*, \varepsilon = 3kT/2$  – заряд, скорость, усредненная эффективная масса и энергия электронов соответственно,  $E$  – напряженность электрического поля,  $V_{si}(\varepsilon), E_{si}(\varepsilon)$  – статические значения дрейфовой скорости электронов и напряженности электрического поля, 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 зависимости дрейфовой скорости электронов от времени при их влёте в область сильного поля (имитация ситуации под затвором транзистора) приведены на рисунке 1. Видно, что использование «цифровых» барьеров (Dop

barrier) в гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием позволяет существенно (на 30 – 40 %) увеличить дрейфовую скорость электронов под затвором.



**Рисунок 1.** Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени: 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).

Помимо этого, набор чередующихся потенциальных барьеров типа сверхрешётки, приводит к локализации внутри нее электронов на квантовых состояниях за пределами квантовой ямы канала. Это может приводить к дополнительному росту дрейфовой скорости электронов, и она приближается к теоретическому пределу для используемой модели - скорости электронов в чистом объёмном материале.

#### 4. Заключение

Из проведенных расчётов можно сделать вывод, что использование цифровых барьеров в гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием является эффективным способом улучшения транзисторных гетероструктур. Приборы на таких структурах могут иметь коэффициент усиления до двух раз выше, при сохранении неизменными других высоких параметров, например, удельной мощности.

#### Список литературы

1. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.Б. Соколов “Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов”// Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – В. 17. – С. 84 – 89.
2. А.А. Борисов, К.С. Журавлев, С.С. Зырин, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.А. Маковецкая, В.И. Новоселец, А.Б. Пашковский, А.И. Торопов, Н.Д. Урсуляк, С.В. Щербаков “Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рHEMT транзисторах” // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – В. 44. – С. 103 – 110.
3. Д.Ю. Протасов, Д.В. Гуляев, А.К. Бакаров, А.И. Торопов, Е.В. Ерофеев, К.С. Журавлев Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рHEMT-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием. // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – В. 6. – С. 77 – 84.
4. С.А. Богданов, А.К. Бакаров, К.С. Журавлев, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, И.А. Рогачёв, Е.В. Терёшкин, С.В. Щербаков “Полевой транзистор миллиметрового диапазона длин волн на основе псевдоморфной гетероструктуры с дополнительными потенциальными барьерами”// Письма в ЖТФ. – 2021. – Т. 47. – В. 7. – С. 52 – 54.
5. А.Б. Пашковский, С.И. Новиков, В.Г. Лапин, В.М. Лукашин, Я.Б. Мартынов. Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-DpHEMT // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – В. 17. – С. 103 – 110.