

# Компенсация нелинейности сток-затворной вольт-амперной характеристики в полевых транзисторах с длиной затвора $\sim 100$ нм

© Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, С.В. Хазанова, Н.Н. Григорьева, О.Л. Голиков, А.Б. Иванов, А.С. Пузанов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603600 Нижний Новгород, Россия

E-mail: tarasova@rf.unn.ru

Поступила в Редакцию 15 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 21 апреля 2020 г.

Принята к публикации 21 апреля 2020 г.

Выполнен анализ нелинейности сток-затворных вольт-амперных характеристик в классических транзисторах Шоттки и транзисторах с двумерным электронным газом на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs и InGaAs/GaAs. Проведен анализ влияния эффекта всплеска скорости носителей заряда в канале транзистора для различных профилей легирования исследуемых структур.

**Ключевые слова:** транзисторы Шоттки и НЕМТ, сток-затворная ВАХ, эффект всплеска скорости носителей заряда.

DOI: 10.21883/FTP.2020.09.49841.35

## 1. Введение

В современной наноэлектронике широко используются полевые транзисторы с каналом из слоя узкозонного полупроводника, формирующего квантовую яму, в которой образуется двумерный электронный газ (НЕМТ). Используются как структуры на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs, InP/InGaAs/InP, GaAs/AlGaAs, InGaAs/GaAs, так и структуры на основе соединения GaN/AlGaIn, в которых квантовая яма формируется за счет возникновения пьезоэлектрической поляризации на границах слоев [1,2]. Нелинейные искажения сигнала в усилителях на основе полевых транзисторов традиционно связывают с нелинейной сток-затворной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) [3]. В данной работе проводится анализ нелинейности ВАХ полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) на основе GaAs и *p*-НЕМТ на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs и InGaAs/GaAs. В настоящее время подобные соединения наиболее широко используются в производстве СВЧ НЕМТ. Особенностью транзисторов такого типа является то, что канал может состоять из нескольких слоев различной проводимости. Ранее авторами [4] детально изучались особенности физикотопологического моделирования данных структур, был предложен комплекс аналитических и численных моделей для расчета электрофизических параметров исследуемых приборов с малой погрешностью.

В работе [5] было изучено влияние различных профилей распределения легирующей примеси в канале классических транзисторов с затвором Шоттки (без квантовой ямы) на нелинейность сток-затворных вольт-амперных характеристик. Рассматривалось равномерное распределение примесей в канале ПТШ и ступенчатое легирование, когда нижний слой легировался больше, чем верхний. Показано, что при равномерном распре-

делении примесей, т.е. в первом случае, нелинейность сток-затворной ВАХ выше, чем в случае ступенчатого легирования (второй случай).

В современных НЕМТ, особенно с длинами канала  $\sim 100$  нм, которые предназначены для работы на частотах 50–150 ГГц и выше, формирование транспорта электронов имеет целый ряд особенностей — квазибаллистический характер движения электронов вдоль канала, модуляция не только толщины, но и длины канала транзистора электрическим полем затвора, сильное влияние особенностей конструкции и технологии изготовления полупроводниковой гетероструктуры на нелинейные искажения усиленного сигнала. Данная работа посвящена моделированию указанных процессов и анализу их влияния на линейность сток-затворной характеристики.

## 2. Общие положения

Известно, что ток, протекающий в канале транзистора, зависит не только от концентрации электронов, но и от их скорости [6]. При реализации усиления в режиме „большого“ сигнала, за счет изменения размеров области пространственного заряда затвора Шоттки (при  $L_g < 100$  нм) наблюдается модуляция длины канала  $L$  транзисторов в пределах от 150 до 300 нм (рис. 1). Причем с уменьшением длины затвора исследуемого транзистора становится более значительным соотношение максимального ( $L_3$ ) и минимального ( $L_1$ ) размеров области пространственного заряда в канале транзистора. Указанное отношение  $L_3/L_1$  в короткоканальных приборах может составлять до 2–3 раз, другими словами, модуляция длины канала значительно влияет на эффекты, происходящие в канале как полевых транзисторов с затвором Шоттки, так и в НЕМТ. За счет квазибаллистических эффектов переноса электронов вдоль

Таблица 1. Параметры сопоставляемых транзисторов

|  | GaAs ПТШ             | GaAs/InGaAs<br>HEMT                                 | AlGaAs/InGaAs/GaAs<br>HEMT                          |
|--|----------------------|---|---|
| Затвор<br>Длина затвора<br>Подзатворный слой | Au<br>100 нм<br>GaAs | Au<br>100 нм<br>GaAs                                | Au<br>100 нм<br>Широкозонный AlGaAs                 |
| Канал  | $N_1$ (GaAs)         | $\delta$ -слой <sub>1</sub>                         | $\delta$ -слой <sub>1</sub>                         |
|  | $N_2$ (GaAs)         | Квантовая яма InGaAs<br>$\delta$ -слой <sub>2</sub> | Квантовая яма InGaAs<br>$\delta$ -слой <sub>2</sub> |
| Изолирующий слой канал-подложка<br>Подложка  | GaAs<br>GaAs         | GaAs<br>GaAs  | Технологическая сверхрешетка<br>GaAs                |

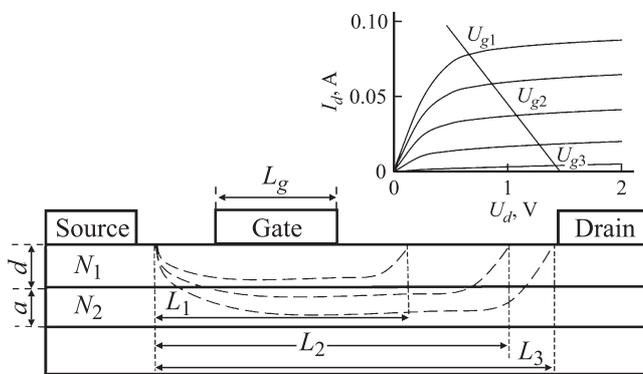


Рис. 1. Модель исследуемого транзистора. В случае классического ПТШ предполагалось, что слои толщиной  $d$  и  $a$  состоят из GaAs с концентрацией примесей  $N_1$  и  $N_2$  соответственно, а в случае HEMT второй слой представлял собой квантовую яму, в первом слое был размещен  $\delta$ -слой легирующей примеси.  $L_g$  — длина затвора,  $L_k$  — длина канала при соответствующих напряжениях на затворе  $U_g$ .

канала транзисторов средняя скорость носителей может в несколько раз меняться на каждом периоде колебаний усиленного сигнала. Все перечисленные факторы будут сильно сказываться на линейности сток-затворной ВАХ и искажениях сигнала. Кроме того, открытым оставался вопрос о влиянии различных полупроводниковых слоев, особенностей их легирования на нелинейность ВАХ исследуемых HEMT. Разработка методика, позволяющей проводить комплексную оценку влияния всех указанных эффектов на ВАХ HEMT, остается крайне актуальной.

### 3. Объекты исследования

В качестве основных объектов исследований были выбраны: полевой транзистор с затвором Шоттки, HEMT на основе соединений AlGaAs/InGaAs/GaAs, и GaAs/InGaAs. Параметры исследуемых структур приведены в табл. 1. Для обеих HEMT структур рас-

сматривалось два варианта конструкции — с одним  $\delta$ -слоем и с двумя, расположенными по обе стороны от квантовой ямы. При рабочих напряжениях в обоих типах транзисторов проводимость в  $\delta$ -слое отсутствовала.

В работе проводилось исследование влияния всплеска скорости в канале транзисторов с затвором Шоттки с однородным легированием (в данном случае предполагалось что  $N_1 = N_2$ ) и со ступенчатым легированием ( $N_1 \neq N_2$ ) на крутизну ВАХ. Полученная в работе методика в дальнейшем применялась для анализа сток-затворных ВАХ современных HEMT с прямоугольной ямой.

### 4. Математическая модель и методика расчетов

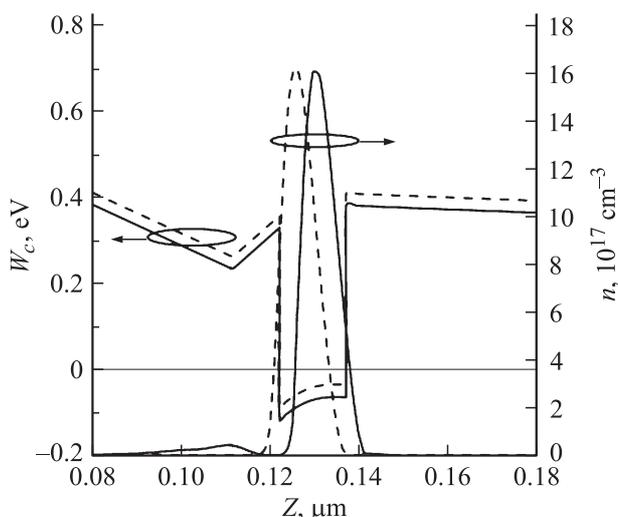
Впервые самосогласованное численное моделирование уравнений Шредингера и Пуассона для расчетов пространственного распределения носителей заряда в канале транзисторов с высокой подвижностью электронов было проведено в работе [7]. Добавление уравнений непрерывности электрического тока и потоков энергии образуют диффузионно-дрейфовую и квазигидродинамическую модели переноса носителей заряда в квантово-размерных структурах.

В настоящее время указанные системы уравнений реализованы в промышленных системах автоматизированного проектирования (САПР) изделий микро- и нанoeлектроники, например, COMSOL Semiconductors [8], TCAD Silvaco [9] и TCAD Sentaurus [10]. При очевидных достоинствах указанных пакетов программ существует и ряд недостатков, связанных с особенностями численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных [11], всегда являющегося компромиссом между точностью и скоростью решения [12], а также существующей связью между погрешностью задаваемых параметров модели и получаемым конечным результатом моделирования. Анализ показывает [13–15], что в нелинейном режиме, необходимом

при расчете интермодуляционных искажений, для получения точности выходных параметров в пределах 15% необходимо определять наиболее критичные входные параметры с погрешностью не более 1%, остальные входные параметры можно определять с погрешностью не более 10%. Таким образом, для поисковых исследований оптимальным представляется следующий подход: расчет зонной диаграммы и распределение носителей заряда в канале транзистора с высокой подвижностью электронов осуществляется численно путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона; расчет всплеска скорости электронов в коротких структурах и дальнейший расчет сток-затворных вольт-амперных характеристик выполняются аналитически.

#### 4.1. Численная модель расчета параметров НЕМТ-структур

В работе проводился расчет зонных диаграмм исследуемых структур и профилей распределения электронов путем решения одномерного уравнения Пуассона и совместного решения уравнения Пуассона и Шредингера в TCAD Silvaco. Кроме того, осуществлены расчеты зонных диаграмм и энергетических состояний в окрестности квантовой ямы с помощью оригинального численного метода. В основе данных численных расчетов лежит решение согласованных уравнений Шредингера и Пуассона, реализованное с помощью конечно-разностной схемы с учетом напряжения, приложенного в направлении роста структуры [16,17]. Хорошая корреляция результатов независимо проведенных расчетов (рис. 2) свидетельствует о корректности полученных данных. Одним из преимуществ оригинального численного расчета является возможность расчета зонных диаграмм



**Рис. 2.** Расчет зонной диаграммы и профиля распределения электронов структуры InGaAs/GaAs: пунктирная кривая — расчет с использованием уравнения Пуассона и Шредингера TCAD Silvaco; сплошная кривая — оригинальная модель.

и квантовой концентрации электронов в структурах с достаточно сложными профилями потенциала, в том числе с высоким уровнем неоднородного легирования, что проблематично сделать в САПР, предназначенных для расчета параметров типовых транзисторов. Одновременно с этим, данная модель численного расчета позволяет проследить тенденцию в изменении профиля концентрации при небольшом шаге по напряжению, приложенному к затвору. Кроме того, методика позволяет более плавное варьирование всех параметров, заложенных в исходной модели.

Предполагается, что расхождение максимумов концентрации носителей заряда в квантовой яме, полученных в разных расчетных моделях, также может быть связано с менее точной оценкой значения фонового легирования исследуемых структур, заложенной в модели расчета TCAD Silvaco.

На основе результатов рассчитанных зонных диаграмм и энергетического спектра в работе получены профили концентрации носителей в канале AlGaAs/InGaAs/GaAs и InGaAs/GaAs НЕМТ при различных напряжениях на затворе в открытом состоянии и вблизи отсечки. По полученным данным проведен аналитический расчет сток-затворных вольт-амперных характеристик, проанализирована крутизна полученных ВАХ.

#### 4.2. Аналитическая модель и методика расчетов

Аналитически были рассчитаны вольт-амперные характеристики в классических GaAs-транзисторах с затвором Шоттки согласно модели, описанной в [3–5]. Рассматривались случаи однородного (для случая  $N_1 = N_2$ ) и ступенчатого (для различных значений  $N_1$  и  $N_2$ ) профиля распределения примесей. Расчет проводился как с учетом, так и без учета зависимости скорости носителей заряда в канале транзистора. Модель включала в себя выражения для расчета скорости носителей заряда в канале, толщины обедненного слоя и выражения для расчета плотности тока в канале транзистора.

Как указывалось выше, в коротких структурах средняя дрейфовая скорость носителей заряда может оказаться в несколько раз больше, чем их стационарная скорость, т.е. может быть реализован эффект всплеска скорости [6]. Зависимость максимально возможной дрейфовой скорости электронов в GaAs канале транзистора от длины канала считалась известной [6], в работе использована ее оригинальная аппроксимация (формула (1)).

Для аналитической оценки всплеска дрейфовой скорости в InGaAs канале исследуемых НЕМТ-структур использованы ранее полученные данные о зависимости времен релаксации энергии и импульса носителей заряда [18]. Таким образом, зависимость скорости носителей заряда в InGaAs от длины канала рассчитывалась по

**Таблица 2.** Зависимость максимального тока стока в исследуемых НЕМТ от толщины спейсерного слоя

| Толщина спейсерного слоя, нм | Толщина спейсерного слоя (в долях от толщины слоя квантовой ямы) | $\Delta I_c = \frac{I_c - I_{c0}}{I_{c0}} 100\%$ |                         |
|------------------------------|--|--|-------------------------|
|                              |  | GaAs/InGaAs НЕМТ                                 | AlGaAs/InGaAs/GaAs НЕМТ |
| 2                            | 0.13   | -4%  | -10%                    |
| 4                            | 0.25   | -15%   | -18%                    |
| 6                            | 0.4  | -20%   | -25%                    |

Примечание.  $I_{c0}$  — максимальное значение тока стока при толщине спейсерного слоя, равной 1 нм;  $I_c$  — максимальное значение тока стока при заданной толщине спейсерного слоя

формуле (2):

$$V_s = 8.5 \cdot e^{-5L} \cdot 10^7 \text{ см/с}, \quad (1)$$

$$V_s = 7.5 \cdot e^{-0.03L} \cdot 10^7 \text{ см/с}, \quad (2)$$

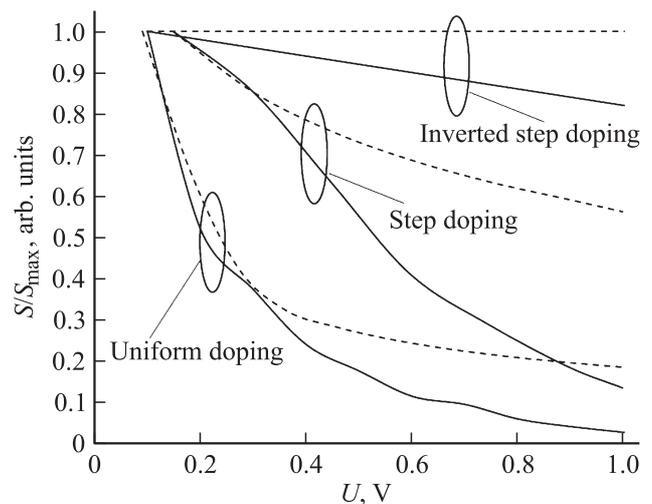
где  $V_s$  — скорость электрона в канале транзистора,  $L$  — длина канала с учетом ширины области пространственного заряда.

Описанные в работе методики расчета профилей потенциала и энергетических спектров позволили выявить влияние расстояния между  $\delta$ -Si легированным слоем и квантовой ямой (толщина спейсерного слоя), а также степени и характера легирования на нелинейность вольт-амперных характеристик НЕМТ.

## 5. Результаты расчетов

На первом этапе работы проводился анализ нелинейности характеристик ПТШ и проводилось сравнение результатов расчетов по предложенному в данной работе подходу с известными ранее данными [3,5] для верификации оригинальной методики расчета. На рис. 3 приведен расчет крутизны ВАХ для полевых транзисторов с затвором Шоттки как для однородного легирования, так и для ступенчатого с учетом и без учета эффекта всплеска дрейфовой скорости. Показано, что спад крутизны ВАХ сильнее выражен для транзисторов с однородным легированием. Кроме того, для каналов с обоими типами распределения примесей учет всплеска скорости носителей заряда в канале приводит к более резкому спаду крутизны характеристики, следовательно, данный эффект дает существенный вклад в нелинейные искажения усилителей на основе транзисторов с длиной затвора  $< 100$  нм и требует обязательного учета при проектировании современных приборов. Также был проведен расчет сток-затворной ВАХ полевого транзистора с затвором Шоттки с инвертированным легированием (в случае распределения примесей  $N_2 > N_1$ ). Получено, что выходные характеристики подобного типа транзисторов будут иметь максимальную линейность, как с учетом, так и без учета эффекта всплеска скорости носителей заряда в канале.

Полученные в результате расчетов данные о возможности реализации линейной сток-затворной ВАХ ПТШ

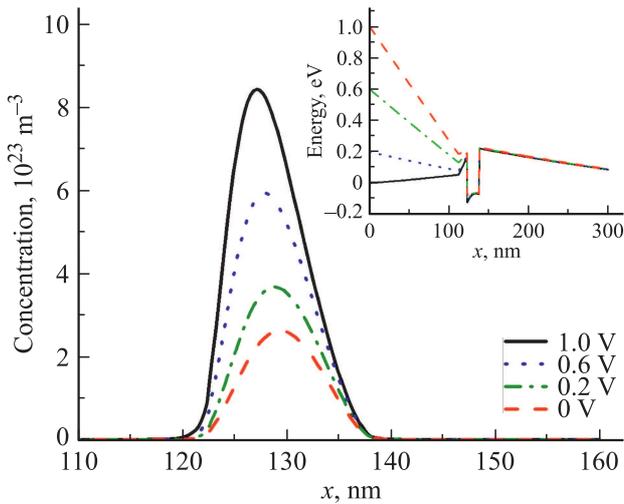


**Рис. 3.** Относительное изменение крутизны ПТШ для линейного легирования и легирования со ступенчатым профилем с учетом (сплошная кривая) и без учета (пунктирная кривая) зависимости скорости носителей заряда от длины канала.

за счет нелинейного (ступенчатого) профиля легирования коррелируют с данными [3,5], где исследовалась такая же задача, но без учета модуляции длины канала транзистора полем затвора. Это позволяет применить предложенную методику для анализа процессов в НЕМТ.

На втором этапе работы с использованием оригинальной верифицированной методики расчетов был проведен анализ зависимости сток-затворной ВАХ транзисторов на основе соединений AlGaAs/InGaAs и GaAs/InGaAs от толщины спейсерного слоя (расстояние между квантовой ямой и  $\delta$ -слоем) с использованием данных о распределении концентрации носителей заряда в квантовой яме исследуемых НЕМТ, полученных с помощью численных расчетов. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Получено, что максимальный ток стока  $I_c$  и крутизна ВАХ в обоих типах структур будет иметь наибольшее значение при самой малой толщине спейсерного слоя. При этом транзисторы на гетероструктуре AlGaAs/InGaAs/GaAs оказываются более чувствительными к положению  $\delta$ -слоя относительно квантовой ямы. При достижении толщины спейсерного слоя порядка поло-



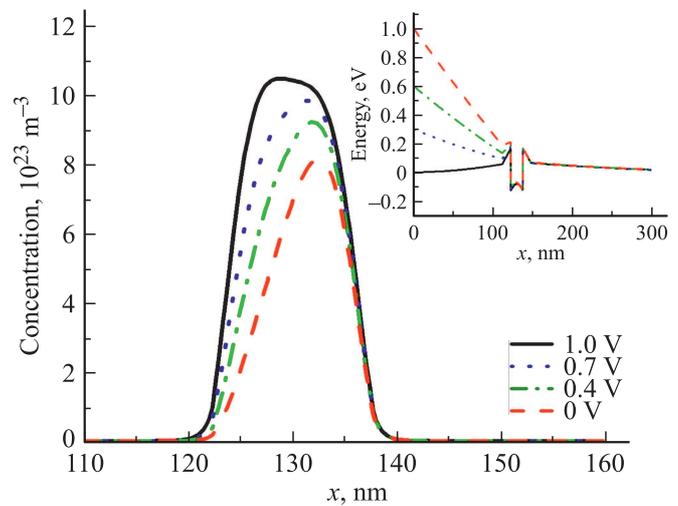
**Рис. 4.** Расчет профиля распределения электронов для InGaAs-структуры с одним  $\delta$ -легирующим слоем. На вставке — расчет зонной диаграммы структуры для различных напряжений на затворе.

вины толщины квантовой ямы (5–7 нм) выходная мощность исследуемых полевых транзисторов уменьшится в 1.5–2 раза. Таким образом, толщину спейсерного слоя проектируемых приборов необходимо подбирать с учетом особенностей зависимости подвижности и дрейфовой скорости носителей заряда в канале, которые в свою очередь существенно зависят от взаимного положения  $\delta$ -легированного слоя и квантовой ямы [19].

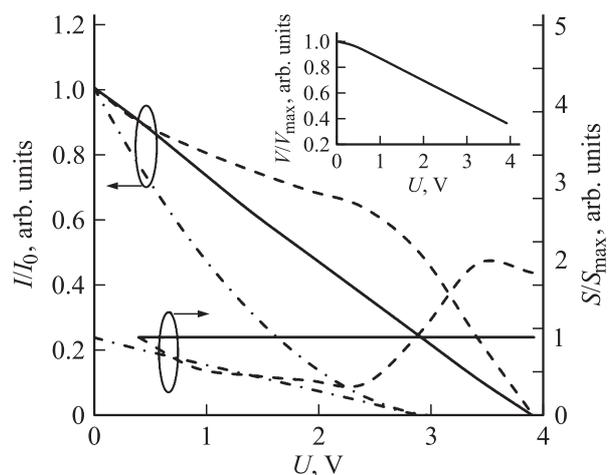
Далее была проведена сравнительная оценка влияния характера легирования на крутизну сток-затворной вольт-амперной характеристики. С этой целью были исследованы структуры с двумя  $\delta$ -легирующими слоями, расположенными по обе стороны от квантовой ямы. В работе рассматривались как структуры с одинаковой степенью легирования  $\delta$ -слоев, так и случай инвертированного легирования, когда слой, находящийся ниже квантовой ямы ( $\delta$ -слой<sub>2</sub>), легирован больше. Расчеты зонной диаграммы и профиля распределения электронов исследуемой структуры с одним  $\delta$ -слоем приведены на рис. 4, с двумя  $\delta$ -слоями — на рис. 5. Данные численных расчетов показывают, что двустороннее  $\delta$ -легирование приводит к тому, что профиль концентрации носителей проводящего канала с ростом напряжения становится более симметричным по сравнению с односторонним легированием. Указанный эффект приводит к изменению интегральной концентрации носителей заряда в канале и к увеличению крутизны ВАХ транзистора на исследуемой структуре на 10%. Также рассматривался случай, когда  $\delta$ -слой<sub>2</sub> легировался в несколько раз больше, чем слой, находящийся над квантовой ямой ( $\delta$ -слой<sub>1</sub>), после чего анализировалась зависимость сток-затворной характеристики от положения  $\delta$ -слоя<sub>1</sub> относительно квантовой ямы. По результатам расчетов можно сделать вывод, что инвертированное легирование

$\delta$ -слоев позволяет получить линейную сток-затворную ВАХ транзистора без учета эффекта всплеска скорости и уменьшить влияние указанного эффекта на нелинейные искажения.

Затем была аналитически рассчитана сток-затворная ВАХ НЕМТ структуры (рис. 6) со ступенчатым „инвертированным“ легированием. Предполагалось, что слой в канале, прилегающий к буферу ( $N_2$ ), легирован сильнее (в  $\sim 10$  раз), чем слой канала, прилегающий к затвору транзистора. Подобное распределение примесей в подзатворной области транзистора может полностью компенсировать нелинейность ВАХ, возникающую из-за влияния всплеска скорости носителей заряда в канале



**Рис. 5.** Расчет профиля распределения электронов для InGaAs-структуры с двумя  $\delta$ -легирующими слоями. На вставке — расчет зонной диаграммы структуры для различных напряжений на затворе.



**Рис. 6.** Компенсация нелинейности ВАХ за счет изменения профиля легирования в НЕМТ: 1 — расчет ВАХ с учетом изменения всплеска скорости в канале транзистора, 2 — расчет ВАХ для инвертированного легирования без учета всплеска скорости в канале транзистора, 3 — расчет ВАХ для классического ступенчатого легирования.

транзистора. Сплошной линией на рис. 6 показана рассчитанная сток-затворная ВАХ и ее крутизна с учетом изменения скорости на 60% (величина изменения скорости носителей заряда в канале НЕМТ показана на вставке к рис. 6).

## 6. Заключение

В работе предложена теоретическая методика анализа влияния параметров гетероструктур на линейность сток-затворных характеристик полевых транзисторов с затвором Шоттки и НЕМТ, которая позволяет оценить степень влияния как профиля распределения примесей, так и эффекта всплеска скорости носителей заряда в канале НЕМТ на линейность сток-затворных ВАХ. С одной стороны, данный подход позволяет оценивать влияние каждого из приведенных эффектов на линейность ВАХ, а с другой — оптимизировать конструкцию НЕМТ с целью компенсации нелинейности ВАХ, вызванной всплеском скорости в канале.

Таким образом, можно заключить, что при проектировании усилителей на основе современных НЕМТ с длинами каналов 100–200 нм необходимо учитывать не только поперечные изменения концентрации носителей заряда в канале, но и продольные, связанные с эффектом всплеска скорости в канале транзистора. Компенсацию всплеска скорости предлагается проводить с помощью увеличения легирования слоя канала, прилегающего к буферу в полевых транзисторах с затвором Шоттки, и с помощью добавления второго легирующего  $\delta$ -слоя в перспективных НЕМТ на основе GaAs.

## Финансирование работы

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования РФ, полученным в рамках ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы“. Уникальный идентификатор проекта RFMEFI62020X0003. Номер соглашения 075-15-2020-529.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.Г. Тихомиров, В.Е. Земляков, В.В. Волков, Я.М. Парнес, В.Н. Вьюгинов, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин, А.Ф. Цацульников, Н.А. Черкашин, М.Н. Мизеров, В.М. Устинов. ФТП, **50** (2), 245 (2016).
- [2] Е.А. Тарасова, С.В. Оболенский, О.Е. Галкин, А.В. Хананова, А.Б. Макаров. ФТП, **51** (11), 1543 (2017).
- [3] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [4] Е. А. Тарасова, Д.С. Демидова, С.В. Оболенский и др. ФТП, **46** (12), 1587 (2012).
- [5] R.E. Williams, D.W. Shaw. IEEE Trans. Electron Dev., ED-25, 600 (1978).
- [6] Ю. Пожела. *Физика быстродействующих транзисторов* (Вильнюс, Мокслас, 1989).
- [7] К. Yokoyama, K. Hess. Phys. Rev. B, **33** (8), 5595 (1986).
- [8] Электронный ресурс <https://www.comsol.com/>
- [9] Электронный ресурс <https://www.silvaco.com/>
- [10] Электронный ресурс <https://www.synopsys.com/>
- [11] D. Vasilevska, S.M. Goodnick, G. Klimeck. *Computational electronics. Semiclassical and quantum device modeling and simulation* (N.Y., CPC Press Taylor & Francis Group).
- [12] Р. Хокни, Дж. Иствуд. *Численное моделирование методом частиц* (М., Мир, 1987).
- [13] Ю.В. Королев, И.А. Ющенко. В сб.: *Диэлектрики и проводники* (Киев, Вышш. шк., 1978) вып. 14, с. 102.
- [14] Д. Калахан. *Методы машинного расчета электронных схем* (М., Мир, 1970).
- [15] Ю.Р. Носов, К.О. Петросянц, В.А. Шилин. *Математические модели элементов интегральной электроники* (М., Сов. радио, 1976).
- [16] С.В. Хазанова, В.Е. Дегтярев, С.В. Тихов, Н.В. Байдусь. ФТП, **49** (1), 53 (2015).
- [17] С.В. Хазанова, В.Е. Дегтярев, Н.Н. Григорьева, О.Л. Голиков. *Физические и физико-химические основы ионной имплантации* (РИУ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2018) с. 33.
- [18] И.Ю. Забавичев, Е.С. Оболенская, А.А. Потехин, А.С. Пузанов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. ФТП, **51** (11), 1489 (2017).
- [19] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).

Редактор А.Н. Смирнов

## The compensation of nonlinearity drain-gate $I-V$ characteristics in field effect transistors with a gate length $\sim 100$ nanometers

E.A. Tarasova, S.V. Obolensky, C.V. Khazanova, N.N. Grigoryeva, O.L. Golikov, A.B. Ivanov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The paper is devoted to the analysis of the nonlinearity of the drain-gate  $I-V$  characteristics in classical Schottky transistors and transistors with two-dimensional electron gas based on AlGaAs/InGaAs/GaAs and InGaAs/GaAs compounds. The effect of the increase of the velocity of charge carriers in the transistor channel for various doping profiles of the structures was analyzed.