

# Влияние профиля легирования на характеристики ионно-легированного полевого GaAs-транзистора с затвором Шоттки

© А.К. Шестаков<sup>¶</sup>, К.С. Журавлев

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 19 мая 2011 г. Принята к печати 30 мая 2011 г.)

Проведено моделирование арсенид-галлиевого ионно-легированного транзистора с затвором Шоттки. Найден профиль легирования, полученный при легировании через диэлектрическую маску, рассчитаны и проанализированы зависимости статических характеристик транзистора от параметров профиля легирования. Исследованы физические процессы, определяющие характеристики транзистора при изменении параметров его профиля легирования и коэффициента компенсации подложки. На основе расчетов предсказаны оптимальные параметры профиля легирования, которые обеспечивают наилучшие характеристики транзистора.

## 1. Введение

Арсенид-галлиевые полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) широко используются в различных областях, таких как сотовая телефония, высокоскоростная оптоволоконная связь, беспроводная передача данных (Wi-Fi, WiMAX), спутниковая связь и радиолокация. Структуры для изготовления этих транзисторов производятся двумя способами: методом эпитаксиального наращивания активных слоев на полупроводящей подложке и методом ионной имплантации в подложку. Хотя транзисторы, изготовленные на основе эпитаксиальных структур, обладают лучшими характеристиками в области высоких частот, транзисторы на ионно-легированных структурах продолжают совершенствоваться, изготавливаться и применяться в различных областях, так как их характеристики удовлетворяют широкому кругу задач, а производство хорошо отлажено как за рубежом, так и в России [1,2].

Характеристики ионно-легированного транзистора: ток насыщения, пороговое напряжение, напряжение пробоя и крутизна передаточной характеристики зависят от параметров подложки: концентраций глубоких и мелких примесей и от параметров профиля легирования: положения пика концентрации легирующей примеси, ширины профиля легирования, концентрации легирующей примеси в максимуме профиля, который формируется с помощью имплантации ионов кремния в подложку [3]. Зависимость статических характеристик транзистора от параметров подложки была исследована в статьях [4–10]. Профиль концентрации легирующей примеси в случае имплантации в подложку с непокрытой поверхностью рассчитывался с помощью аналитических формул и моделей [6]. При изготовлении канала транзистора имплантация часто проводится через диэлектрическую маску (пленку SiO<sub>2</sub> или Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Использование маски является одним из методов подавления эффекта каналирования, что позволяет получить более резкий профиль [3,5,6], а также предотвращает распыление материала подложки

при имплантации. В случае имплантации через диэлектрическую маску расчет формы профиля концентрации усложняется из-за разного пробега имплантируемых ионов в диэлектрике и полупроводнике, а также из-за различия масс атомов этих материалов [5] и потерь части ионов, оставшихся в диэлектрике после имплантации. Варьируя толщину, химический состав и атомную структуру диэлектрической пленки, а также подбирая режимы имплантации и активационного отжига структур, можно управлять профилем легирования, а следовательно, и выходными характеристиками транзистора [3,5–8].

Наиболее восприимчивыми характеристиками транзистора к изменению параметров профиля концентрации легирующей примеси являются ток насыщения — ток стока при выходе транзистора в режим насыщения и пороговое напряжение — напряжение на затворе, при котором обедненный слой едва перекрывает канал у истока. Эти характеристики определяют основные параметры транзистора, а именно его выходную мощность, которая оценивается в статическом случае как произведение выходного тока на выходное напряжение, и коэффициент усиления (КУ), который оценивается в статическом случае как отношение произведения выходного тока на выходное напряжение к произведению входного тока на входное напряжение [3]. Повышение мощности и КУ транзистора является важной задачей при проектировании и изготовлении исходной полупроводниковой структуры. Для решения этой задачи необходимо найти зависимость характеристик транзистора от параметров профиля легирования, а затем найти такое соотношение этих параметров, при которых характеристики транзистора будут наиболее оптимальными.

Зависимость характеристик транзистора от параметров профиля легирования можно найти двумя путями: экспериментально и с помощью компьютерного моделирования. Моделирование позволяет решить эту задачу быстрее и с меньшими затратами материальных ресурсов. Для моделирования используются как аналитические [9,10], так и численные модели [11]. В аналитических моделях при расчете всегда допускаются некоторые упрощения, необходимые для того, чтобы все уравнения,

<sup>¶</sup> E-mail: shestakov@thermo.isp.nsc.ru

входящие в модель, решались в аналитическом виде. Например, условия на однородность электрического поля в канале транзистора или резкий переход между обедненной областью под затвором и каналом. Это не всегда хорошо сказывается на точности решения, особенно при небольших геометрических размерах транзистора, когда в канале возникают значительные напряженности и градиенты электрического поля и значительные градиенты концентраций носителей заряда. Поэтому в случае транзисторов с затвором малой длины целесообразно использовать численные методы расчетов статических характеристик транзистора, хотя эти методы и более затратны в плане вычислительных мощностей.

В данной статье с использованием численного компьютерного моделирования были исследованы зависимости статических выходных характеристик арсенид-галлиевого полевого транзистора с барьером Шоттки от параметров профиля легирования. Также были исследованы физические процессы, определяющие характеристики транзистора при изменении параметров его профиля легирования и коэффициента компенсации подложки, что не удавалось сделать раньше с помощью использования простых аналитических моделей.

## 2. Используемая модель, параметры транзистора и метод расчета

### 2.1. Модель расчета транзистора

Для расчетов вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора был использован пакет программно-технологического моделирования Sentaurus TCAD, разработанный фирмой Synopsys [12]. Расчет производился при помощи двумерной гидродинамической модели [13], учитывающей зависимость подвижности носителей заряда от напряженности электрического поля, концентрации легирования и рассеяния на границах, а также явления лавинной генерации и рекомбинации носителей заряда. Основные параметры, которые использовались в модели для расчета: ширина запрещенной зоны, диэлектрическая проницаемость, подвижность электронов и дырок и их эффективная масса для каждого полупроводника, брались из базы данных, входящей в пакет программно-технологического моделирования Sentaurus TCAD. Задавалась расчетная сетка, в узлах которой рассчитывались следующие величины: электростатический потенциал, напряженность электрического поля, концентрация электронов и дырок, температура электронов и дырок, скорость и подвижность электронов и дырок, плотность электронного и дырочного токов, темпы генерации и рекомбинации электронов и дырок, рекомбинация и генерация электронов и дырок через глубокие уровни, заполнение ловушек электронами и дырками, энергия зоны проводимости и валентной зоны. В областях резкого изменения рассчитываемых величин, например, таких как электрическое поле или концентрации носителей заряда, шаг сетки уменьшался.

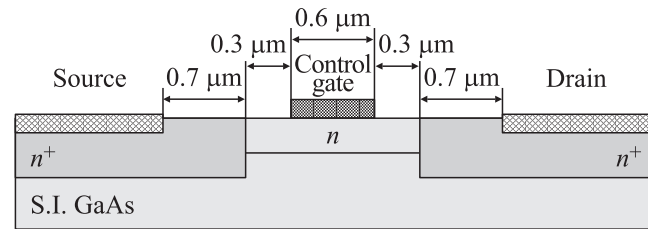


Рис. 1. Геометрия и размеры ионно-легированного транзистора.

### 2.2. Геометрия и характеристики транзистора

Для проверки используемой модели было проведено сравнение рассчитанных характеристик прибора с экспериментальными результатами. Анализируемый ионно-легированный ПТШ был изготовлен на полуизолирующей арсенид-галлиевой подложке с удельным сопротивлением  $\rho > 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  толщиной  $500 \mu\text{m}$ , формированием профилей легирования в областях канала и контактов стока и истока с помощью имплантации ионов кремния. Геометрия транзистора и его геометрические размеры представлены на рис. 1. Удельное сопротивление омических контактов истока и стока были определены экспериментально и равны  $\rho = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , высота барьера Шоттки, также измеренная экспериментально, была равна  $\phi_b = 0.6 \text{ эВ}$ . Транзистор обладал следующими характеристиками: ток насыщения сток-исток  $I_{\text{dss}} = 300 \text{ mA/mm}$  и пороговое напряжение  $V_{\text{th}} = -2.3 \text{ В}$ . Параметры транзистора измерялись в квази-импульсном режиме для того, чтобы уменьшить влияние эффекта разогрева канала. Измерения проводились на установке контроля полупроводниковых приборов Л2-56 на частоте  $200 \text{ Гц}$  в НИИПП (г. Томск). Были измерены характеристики большого количества изготовленных транзисторов, а затем было произведено усреднение результатов измерений.

### 2.3. Метод расчета параметров профиля легирования канала

При изготовлении канала транзистора в GaAs-подложку через пленки  $\text{SiO}_2$  толщиной  $15 \text{ нм}$  имплантировались ионы кремния с энергией  $E = 40 \text{ кэВ}$ , доза имплантируемых ионов равнялась  $Q = 1.1 \text{ мкКл/см}^2$ . Для подавления эффекта каналирования при имплантации угол отклонения подложки относительно нормали к плоскости падения ионов был равен  $10^\circ$ . Отжиг примеси производился  $13 \text{ мин}$  при температуре  $T = 850^\circ \text{C}$ . Профиль легирования, получающийся после имплантации и активационного отжига, предполагался гауссовым, что в данных условиях создания профиля может считаться оправданным, тем более что хвост профиля, уходящий в подложку, компенсировался глубокими уровнями и поэтому существенного влияния на характеристики транзистора не оказывал. При расчете профиль описывался

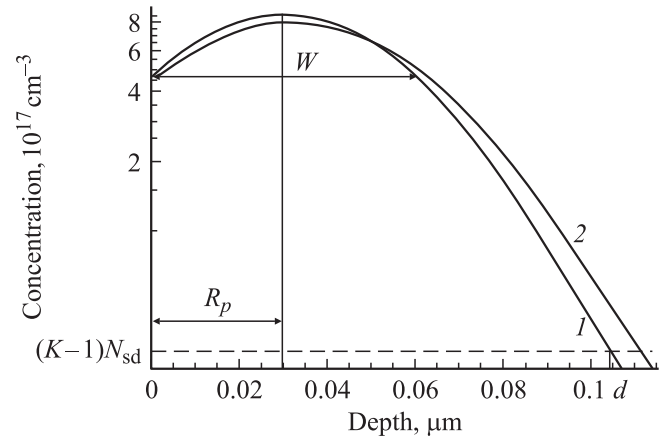
следующей формулой:

$$N(x) = \frac{K_{\text{act}}Q}{\sqrt{2\pi}\Delta\bar{R}_p} \exp\left[-\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2\Delta\bar{R}_p^2}\right]. \quad (1)$$

В этой формуле приняты следующие обозначения:  $\bar{R}_p$  — проекция среднего пробега имплантированных ионов в подложке, которая определяет положение пика концентрации легирующей примеси,  $\Delta\bar{R}_p$  — среднеквадратичное отклонение среднего пробега, задающее ширину профиля легирования,  $Q$  — дозы имплантированных ионов и  $K_{\text{act}}$  — коэффициент активации примеси, а величина, равная  $K_{\text{act}}Q/\sqrt{2\pi}\Delta\bar{R}_p$ , дает концентрацию легирующей примеси в максимуме профиля. Коэффициент активации равен отношению концентрации электрически активной после процесса отжига примеси к полной концентрации имплантированной примеси. Положение пика концентрации легирующей примеси определялось относительно поверхности транзистора, на которой расположены электроды истока, стока и затвора. Параметры профиля легирования определяются параметрами процесса ионной имплантации: энергией имплантации ионов, дозой имплантированной примеси, толщиной диэлектрической пленки, через которую проводится имплантация, температурой и временем активационного отжига. Изменение одного из технологических параметров процесса имплантации приводит к изменению сразу всех параметров профиля легирования. Для упрощения задачи оптимизации характеристик транзистора при расчетах параметры профиля варьировались независимо друг от друга. Области  $n^+$  под истоком и стоком также формировались с помощью ионной имплантации с энергией  $E_{n^+} = 50$  кэВ и суммарной дозой имплантированных ионов  $Q_{n^+} = 2$  мкКл/см<sup>2</sup>, параметры их профилей легирования не варьировались.

На рис. 2 показаны профили легирования канала (распределения концентрации имплантированных атомов кремния), рассчитанные по формуле (1), при которых рассчитанные вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов совпадали с характеристиками транзистора, измеренными экспериментально. Метод расчета ВАХ описан в следующем разделе.

Подложка характеризовалась коэффициентом компенсации. Концентрация мелких фоновых доноров в GaAs-подложке, согласно литературным данным, составляет  $N_{\text{sd}} = 10^{16}$  см<sup>-3</sup> [14]. Для уменьшения проводимости подложки в нее в процессе роста добавляется компенсирующий глубокий акцептор с энергией активации  $E_{\text{at}} = 0.64$  эВ [14], но точная концентрация этого акцептора неизвестна. При расчете концентрация глубоких акцепторов варьировалась в пределах от  $N_{\text{da}} = 1.5 \cdot 10^{16}$  до  $4 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Коэффициент компенсации определялся как отношение концентрации глубоких акцепторов к концентрации мелких доноров в подложке и принимал следующие значения:  $K = 1.5, 2.5, 3$  и  $4$ . При слишком малых концентрациях компенсирующей примеси ( $K < 1.5$ ) пороговое напряжение и ток насыщения



**Рис. 2.** Профили легирования ионно-легированного транзистора, полученные при совпадении его расчетных и экспериментальных ВАХ, при варьировании положения пика профиля (1) и ширины профиля (2).  $W$  — ширина профиля легирования на половине его высоты, связанная с дисперсией проекции среднего пробега соотношением  $W = 2\Delta\bar{R}_p\sqrt{2\ln 2}$ .  $d$  — толщина канала транзистора. Штриховой линией обозначена концентрация компенсирующей фоновой примеси, равная  $(K-1)N_{\text{sd}}$ . Коэффициент компенсации подложки в данном случае равен 2.5.

значительно превосходил экспериментально полученные значения из-за того, что подложка являлась проводящей и часть тока между истоком и стоком протекала через подложку. При слишком больших концентрациях компенсирующей примеси ( $K > 4$ ) ток насыщения и пороговое напряжение были значительно меньше, чем величины, измеренные экспериментально, что объяснялось снижением концентрации и подвижности электронов в канале.

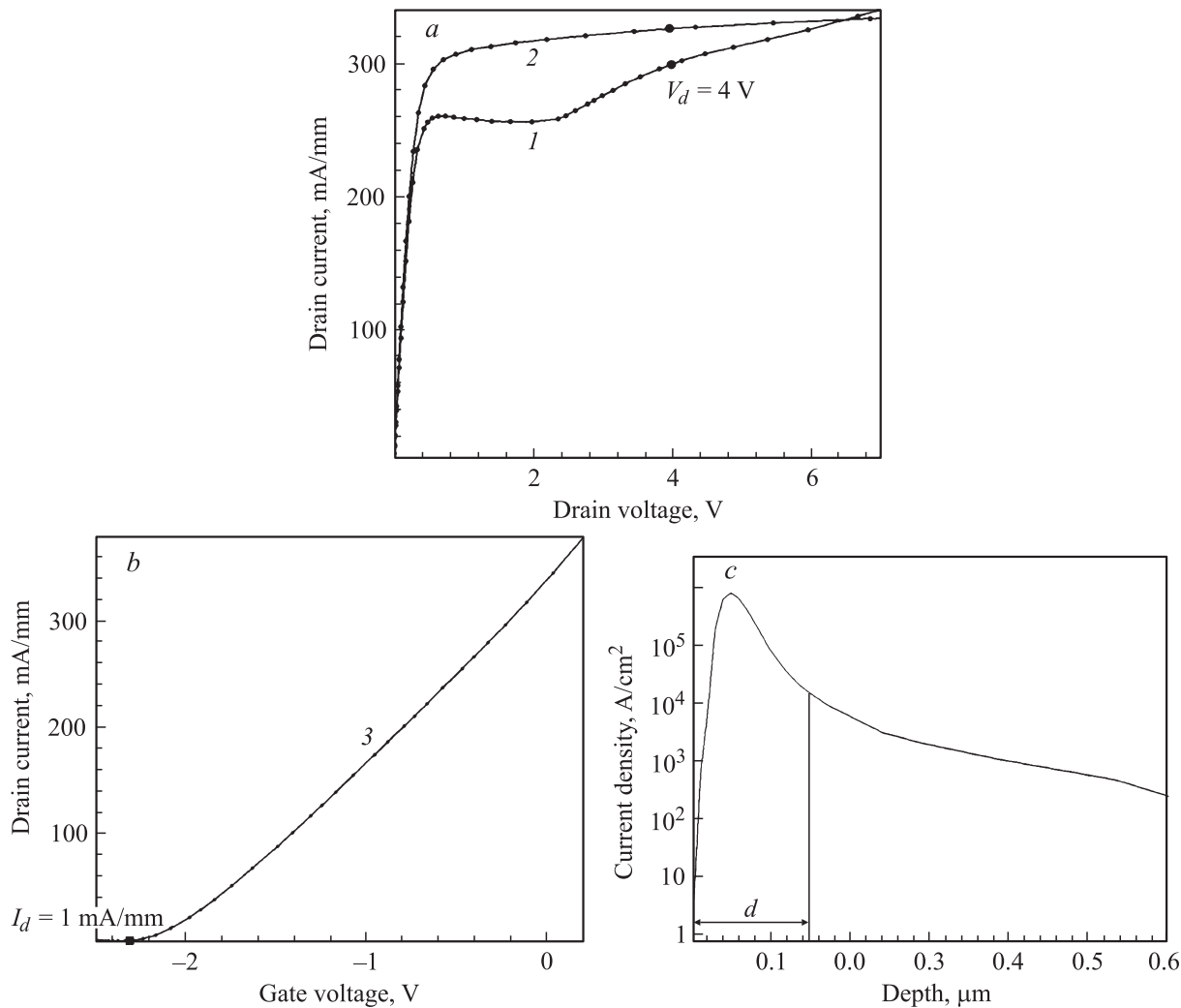
Концентрацию электрически активной примеси в канале можно найти по формуле

$$N_{\text{dop}}(x) = N(x) + N_{\text{sd}} - N_{\text{da}} = N(x) - (K-1)N_{\text{sd}}, \quad (2)$$

т. е. фоновые мелкие доноры увеличивают итоговую концентрацию легирования, а глубокие акцепторы уменьшают итоговую концентрацию за счет захвата электронов на глубокие уровни. Если проинтегрировать выражение (2) по координате, направленной в глубину подложки, то можно получить плотность заряда в канале:

$$\begin{aligned} n &= \int_0^d (N(x) + N_{\text{sd}} - N_{\text{da}}) dx \\ &= (K_{\text{act}}(Q - Q_1) - (K-1)N_{\text{sd}}d), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $d$  — толщина канала,  $Q_1$  — часть плотности заряда, которая при имплантации задерживается в диэлектрической пленке и удаляется вместе с ней. Толщину канала можно получить из следующего соотношения:



**Рис. 3.** *a* — зависимости тока стока от напряжения на стоке. Ток насыщения показан на графиках жирными черными точками. Напряжение на затворе 0 В. Кривая 1 соответствует расчету, проведенному с помощью полной модели, описанной в разд. 2.2, кривая 2 рассчитана с помощью самой простой модели, которая подробнее описана в конце этого раздела. *b* — зависимость тока стока от напряжения на затворе. Напряжение на стоке 7 В. Коэффициент компенсации подложки в обоих случаях равен 2.5. *c* — зависимость плотности тока, протекающего через канал и подложку транзистора, от расстояния, отсчитываемого от центра затвора в глубину подложки. Напряжение на стоке 5 В, напряжение на затворе 0 В, коэффициент компенсации подложки  $K = 1.5$ , толщина канала 0.143 мкм, положение профиля легирования 0.03 мкм, ширина профиля легирования 0.07 мкм, коэффициент активации 0.8.

$N(d) - (K - 1)N_{sd} = 0$ , т.е. краем канала можно считать такую координату  $d$ , при которой концентрация имплантированной примеси будет равна концентрации компенсирующей примеси в подложке. Из этого условия можно вычислить толщину канала:

$$d = \bar{R}_p + \sqrt{2\Delta\bar{R}_p} \sqrt{\ln \frac{K_{act}Q}{\sqrt{2\pi}\Delta\bar{R}_p(K - 1)N_{sd}}}. \quad (4)$$

Из полученной формулы видно, что основные факторы, влияющие на толщину канала, — это проекция среднего пробега  $\bar{R}_p$  и дисперсия среднего пробега  $\Delta\bar{R}_p$ . В значительно меньшей степени на нее влияет коэффициент компенсации подложки.

Воспользовавшись одномерным уравнением Пуассона в приближении плавного канала:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{eN_{dop}(x)}{\epsilon}, \quad (5)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость арсенида галлия, и проинтегрировав это выражение по всей толщине канала, можно оценить пороговое напряжение:

$$V_{th} = V_{bi} - \frac{e}{\epsilon} \int_0^d xN_{dop}(x)dx, \quad (6)$$

где  $V_{bi}$  — контактная разность потенциалов. Таким образом, в первом приближении ток насыщения прямо

пропорционален плотности заряда в канале и не зависит от формы профиля (формула (3)), а пороговое напряжение прямо пропорционально интегралу от концентрации заряда в канале и зависит от распределения примеси в нем (формула (6)) [15,16]. Все эти зависимости были получены с помощью простых аналитических формул только для оценки этих величин и понимания процессов, происходящих в канале транзистора. При численном моделировании расчеты характеристик транзистора проводились с помощью более сложных методов.

## 2.4. Расчет статических характеристик транзистора

Рассчитанные статические вольт-амперные характеристики представлены на рис. 3, *a* и *b*. Кривые 1 и 2 на рис. 3, *a* соответствуют зависимости тока стока от напряжения на стоке (проходные характеристики транзистора), рассчитанные в рамках полной и упрощенной моделей соответственно. Жирными черными точками на этих кривых отмечен ток насыщения транзистора, который определялся при напряжении на стоке 4 В и напряжении на затворе 0 В. На рис. 3, *b* показана зависимость тока стока от напряжения на затворе (переходная или передаточная характеристика). Из этой зависимости определялось пороговое напряжение, отмеченное на графике черным квадратом, т.е. такое напряжение на затворе, при котором ток, протекающий через канал, уменьшался до 1 мА/мм при напряжении на стоке 7 В. Кроме вольт-амперных характеристик также рассчитывалось распределение плотности тока в транзисторе для анализа характера протекания тока между истоком и стоком. Результаты данного расчета представлены на рис. 3, *c*. Из него видно, что ток между истоком и стоком протекает не только через канал транзистора, но и через подложку. При коэффициенте компенсации, равном 1.5, через подложку протекает до 3% от всего тока между истоком и стоком. При увеличении коэффициента компенсации до 2.5 доля тока, протекающего через подложку, падает до 0.3% и при дальнейшем увеличении коэффициента компенсации она продолжает уменьшаться.

Расчет характеристик транзистора был выполнен для серий значений каждого из параметров профиля легирования. В качестве базовых брались параметры профиля легирования, полученного имплантацией непосредственно в полуизолирующую GaAs-подложку, так как рассчитать параметры такого профиля было достаточно просто. Варьирование параметров профиля производилось в некоторых пределах относительно их базовых значений. Для наглядности представления влияния изменения каждого из параметров профиля легирования на характеристики транзистора были построены зависимости их относительного изменения от относительного изменения параметров профиля легирования. Моделирование позволяет рассмотреть влияние на характеристики прибора каждого из параметров профиля легирования по

отдельности. При изготовлении реального прибора можно постараться подобрать такие условия имплантации, чтобы исследовать влияние одного параметра профиля на характеристики транзистора при неизменных других, но сделать это достаточно сложно.

Аналитические модели, использованные в работах [8,9] для расчета статических ВАХ транзистора, не учитывают эффекты генерации и рекомбинации носителей заряда, а также эффекта протекания электрического тока через подложку. Кроме того, геометрические размеры рассчитываемого транзистора достаточно малы, поэтому в канале транзистора возникают сильные электрические поля, что может приводить к появлению процессов генерации и рекомбинации носителей заряда [17]. Поэтому, для того чтобы проверить, влияют ли эти эффекты на результаты расчета, было проведено сравнение результатов, полученных с помощью полной модели, учитывающей все эффекты, и результатов, полученных с помощью упрощенной модели, в которой эти эффекты не учтены. В остальном упрощенная модель ничем не отличается от полной модели и по сути сложнее, чем простые аналитические модели, которые использовались раньше для расчета.

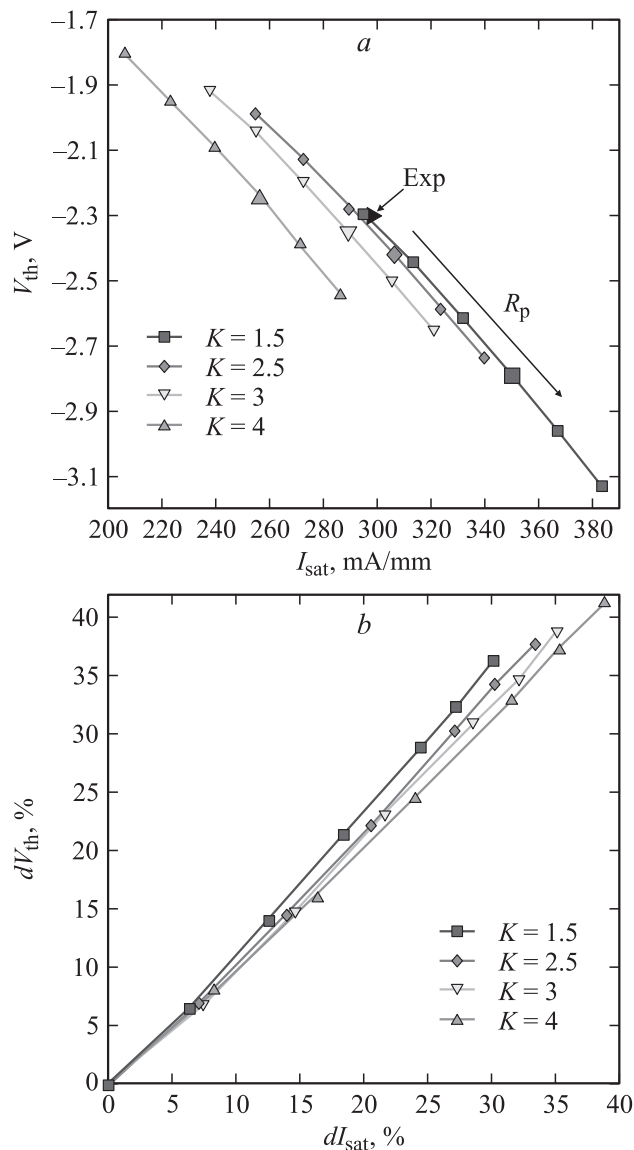
## 3. Зависимость характеристик транзистора от параметров профиля легирования

### 3.1. Влияние положения максимума профиля легирования на характеристики транзистора

На первом этапе были рассчитаны зависимости тока насыщения и порогового напряжения ПТШ от положения пика концентрации профиля легирующей примеси ( $R_p$ ) при различных значениях коэффициента компенсации и фиксированных значениях ширины профиля и коэффициента активации. Такая ситуация может быть реализована экспериментально при увеличении энергии имплантации и одновременном изменении дозы имплантированной примеси и толщины диэлектрической пленки, хотя подобрать соотношение этих величин достаточно сложно. Результаты расчетов тока насыщения и порогового напряжения представлены на рис. 4, *a*, где каждая кривая соответствует определенному коэффициенту компенсации, а каждая точка на кривой соответствует определенному положению пика концентрации. Базовое значение положения пика концентрации легирующей примеси было равно 0.032 мкм. Положение пика концентрации варьировалось от 0.026 до 0.036 мкм с шагом 0.002 мкм. Ширина профиля была равной 0.068 мкм, коэффициент активации — равным 0.8, что соответствовало базовым параметрам профиля легирования.

Из данного рисунка видно, что построенная модель хорошо описывает характеристики транзистора, а

наиболее близкие к экспериментальным значения тока насыщения и порогового напряжения получаются при положениях пиков, равных 0.026 и 0.03 мкм, в подложках, характеризуемых коэффициентами компенсации, равными 1.5 и 2.5 соответственно. Сравнение



**Рис. 4.** *a* — значения порогового напряжения и тока насыщения при различных положениях пика концентрации и различных значениях коэффициента компенсации ( $K$ ). Расстояние пика концентрации от поверхности варьировалось от 0.026 до 0.036 мкм с шагом 0.002 мкм. Направление заглупления профиля показано стрелкой с надписью  $R_p$ . Экспериментальные значения порогового напряжения и тока насыщения, равные 300 мА/мм и  $-2.3$  В соответственно, отмечены знаком Exp. Базовые значения положения пика показаны значками увеличенного размера. *b* — значения относительного изменения порогового напряжения и относительного изменения тока насыщения при изменении положения пика концентрации для различных коэффициентов компенсации ( $K$ ). Расстояние пика концентрации от поверхности варьировалось от 0.026 до 0.036 мкм с шагом 0.002 мкм.

расчетных данных и данных из работы [6] показывает, что рассчитанная глубина залегания профиля легирования меньше примерно на толщину диэлектрической пленки, чем глубина залегания профиля, полученного с помощью имплантации в непокрытую диэлектриком подложку. Совпадение расчетных и экспериментальных значений тока насыщения и порогового напряжения при различных значениях положения максимума профиля легирования объясняется тем, что можно получить одни и те же значения тока насыщения и напряжения отсечки, подобрав различные комбинации параметров профиля легирования и коэффициента компенсации.

Полученные зависимости объясняются тем, что при заглуплении профиля толщина канала увеличивается линейно с изменением положения пика профиля легирования, что видно из формулы (4). Увеличение толщины канала приводит к возрастанию плотности заряда в нем и соответственно к возрастанию тока насыщения. Так как ни ширина, ни форма профиля не меняются при заглуплении, то пороговое напряжение также возрастает линейно с увеличением толщины канала. Повышение коэффициента компенсации подложки уменьшает толщину канала и плотность заряда в нем за счет захвата носителей заряда на глубокие уровни, находящиеся в подложке, что приводит к пропорциональному снижению тока насыщения и порогового напряжения, но характер их зависимостей от положения пика концентрации легирующей примеси остается тем же самым.

Для расчета относительно изменения тока насыщения на каждом шаге ( $R_{pi}$ ) вычислялось его изменение относительно начального значения (при  $R_{p0} = 0.026$  мкм) по следующей формуле:

$$dI_{\text{sat}} = \frac{I_{\text{sat}}(R_{pi}) - I_{\text{sat}}(R_{p0})}{I_{\text{sat}}(R_{p0})}. \quad (7)$$

Относительные изменения порогового напряжения рассчитывались по подобной формуле. Результаты расчета представлены на рис. 4, *b*. Из этого рисунка видно, что для всех коэффициентов компенсации при заглуплении профиля легирования скорость роста порогового напряжения больше, чем скорость роста тока насыщения. Пороговое напряжение растет за счет того, что при смещении профиля в глубь подложки увеличивается не только плотность заряда в канале за счет увеличения его толщины, но и весь профиль целиком сдвигается дальше от затвора, поэтому для перекрытия канала нужно приложить большее напряжение. Увеличение коэффициента компенсации в большей степени влияет на скорость роста тока насыщения, который возрастает при заглуплении профиля на 30.2% для  $K = 1.5$  и на 38.9% для  $K = 4$ . При этом расчет показывает, что относительное изменение плотности заряда при заглуплении профиля почти не зависит от коэффициента компенсации, так при  $K = 1.5$  плотность заряда в канале увеличивается на 9.1%, а при  $K = 4$  — на 9.2%. Подвижность электронов в канале зависит от двух факторов: концентрации примесей и напряженности электрического

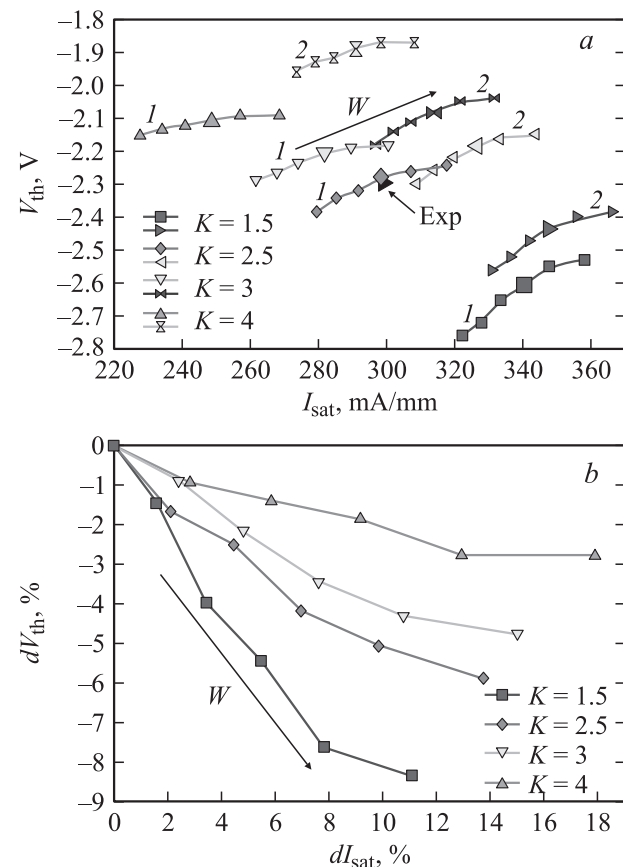


поля. Расчеты показывают, что средняя подвижность электронов в канале возрастает при повышении коэффициента компенсации. Такое поведение подвижности в сильном электрическом поле объясняется изменением распределения электрического поля в канале при увеличении концентрации компенсирующей примеси, напряженность которого несколько падает в канале, но увеличивается в части подложки, расположенной под ним, т.е. при увеличении коэффициента компенсации электрическое поле частично выдавливается в глубь подложки. Заглубление профиля также меняет распределение электрического поля в канале, что еще более увеличивает среднюю подвижность электронов. Таким же образом изменение распределения электрического поля влияет на величину средней скорости насыщения электронов в канале, в результате чего она также возрастает при увеличении коэффициента компенсации и заглублении профиля. Подобное поведение подвижности и скорости насыщения объясняет то, что при увеличении коэффициента компенсации скорость роста тока насыщения с заглублением профиля возрастает, так как чем быстрее носители заряда проходят через канал, тем больше ток насыщения. Изменение скорости роста порогового напряжения при заглублении профиля связано с увеличением толщины канала, который при  $K = 1.5$  увеличивается на 8.85%, а при  $K = 4$  — на 10.42%. Изменение подвижности и скорости насыщения не влияет на пороговое напряжение, поэтому при увеличении коэффициента компенсации скорость роста порогового напряжения с заглублением профиля изменяется не так значительно, как скорость роста тока насыщения.

### 3.2. Влияние ширины профиля легирования на характеристики транзистора

На следующем этапе была рассчитана зависимость тока насыщения и порогового напряжения от ширины профиля легирования. Значения положения пика концентрации примеси и коэффициента активации при этом оставались постоянными. Отметим, что, согласно выражению (1), увеличение ширины профиля приводит к уменьшению концентрации имплантированной примеси в максимуме. В принципе ширина профиля меняется с изменением энергии имплантации ионов, но в этом случае изменяется не только ширина профиля, но и глубина его залегания. Для того чтобы изменять только ширину профиля, не изменяя глубину залегания, нужно менять одновременно еще и толщину диэлектрической пленки и дозу имплантируемых ионов. На рис. 5, *a* представлены результаты проведенных расчетов. Базовое значение ширины профиля легирования было равно 0.068 мкм. Ширина профиля варьировалась от 0.078 до 0.062 мкм со средним шагом 0.003 мкм (шаг изменения ширины незначительно менялся). Значения положения пика концентрации и коэффициента активации брались равными 0.032 мкм и 0.8 соответственно. Из расчетов видно, что при уменьшении ширины профиля ток насыщения

возрастает, а пороговое напряжение убывает. Таким образом, при уменьшении ширины профиля легирования одновременно возрастает и мощность транзистора, и его КУ, следовательно, при изготовлении ионно-легированных структур нужно стремиться к получению наиболее узкого и резкого профиля. Эти результаты также показывают, что предельным случаем узкого канала с резким профилем легирования будет эпитаксиальная легированная пленка, при использовании которой достигаются наилучшие значения мощности и КУ транзистора, что подтверждается литературными данными [4].



**Рис. 5.** *a* — значения порогового напряжения и тока насыщения при различной ширине профиля легирования и различных значениях коэффициента компенсации ( $K$ ). Ширина профиля варьировалась от 0.078 до 0.062 мкм со средним шагом 0.003 мкм. Направление уменьшения ширины профиля показано стрелкой с надписью  $W$ . Экспериментальные значения порогового напряжения и тока насыщения, равные 300 мА/мм и  $-2.3$  В соответственно, отмечены знаком  $Exp$ . Базовые значения ширины профиля показаны значками увеличенного размера. Группа зависимостей, обозначенных цифрой 1, рассчитана с помощью полной модели. Группа зависимостей, обозначенных цифрой 2, рассчитана с помощью самой простой модели. *b* — значения относительного изменения порогового напряжения и относительного изменения тока насыщения при изменении ширины профиля легирования для различных коэффициентов компенсации ( $K$ ). Ширина профиля варьировалась от 0.078 до 0.062 мкм со средним шагом 0.003 мкм. Направление уменьшения ширины профиля показано стрелкой с надписью  $W$ .

По результатам расчетов, представленных на этом рисунке, наиболее близкие к экспериментальным результатам значения тока насыщения и порогового напряжения получаются при ширине пика, равном 0.07 мкм, в подложке, характеризуемой коэффициентом компенсации, равным 2.5. Сравнение расчетных данных с экспериментальными показало, что при имплантации ионов через диэлектрик профиль немного уширяется за счет рассеяния имплантируемых ионов в аморфном диэлектрике, кроме того, как видно из сравнения с расчетами, проведенными в предыдущем подразделе, в данном случае получился более широкий профиль, залегающий глубже в подложке.

При уменьшении ширины профиля плотность заряда в канале возрастает из-за двух факторов: уменьшения потерь в диэлектрической пленке (член  $Q_1$  в формуле (3)) и уменьшения влияния компенсирующей примеси (член  $(K-1)N_{sd}d$  в той же формуле). Возрастание плотности заряда в канале увеличивает и ток насыщения, и пороговое напряжение, но с другой стороны, согласно формуле (6), сужение профиля приводит к уменьшению порогового напряжения, которое происходит примерно пропорционально квадрату толщины канала (член  $x dx$  под интегралом). В результате получается, что с уменьшением ширины профиля ток насыщения возрастает, а пороговое напряжение уменьшается.

Для нахождения относительных изменений тока насыщения и порогового напряжения на каждом шаге считалось изменение этих характеристик относительно начального значения ширины профиля (0.078 мкм). Расчеты производились по формуле, подобной формуле (7). Полученные результаты представлены на рис. 5, *b*. При изменении ширины профиля от 0.078 до 0.062 мкм и при коэффициенте компенсации, равном 1.5, толщина канала уменьшается на 21.4%, а плотность заряда в нем увеличивается на 10.66%. В отличие от предыдущего случая средняя подвижность электронов и их средняя скорость насыщения в канале при изменении ширины профиля возрастают значительно меньше по сравнению с плотностью заряда и толщиной канала, на 5.5 и 0.12% соответственно. Таким образом, ток насыщения увеличивается на 11.8% за счет увеличения плотности заряда в канале, а пороговое напряжение падает на 8.3% из-за уменьшения толщины канала. Как видно из рис. 5, *b*, с увеличением коэффициента компенсации скорость изменения обеих характеристик меняется. При  $K = 4$  сужение профиля от 0.078 до 0.062 мкм уменьшает толщину канала на 18.96%, а плотность заряда в канале увеличивает на 12.69%, что уже не может объяснить полученного в расчете увеличения тока насыщения на 17.89% и уменьшения порогового напряжения на 2.8%. При этом средняя подвижность и средняя скорость насыщения электронов в канале увеличиваются всего на 2%. Как было обнаружено, увеличение скорости возрастания тока насыщения объясняется возникновением межзонной ударной ионизации, которая приводит к лавинной генерации электронно-дырочных пар. Она возникает из-за

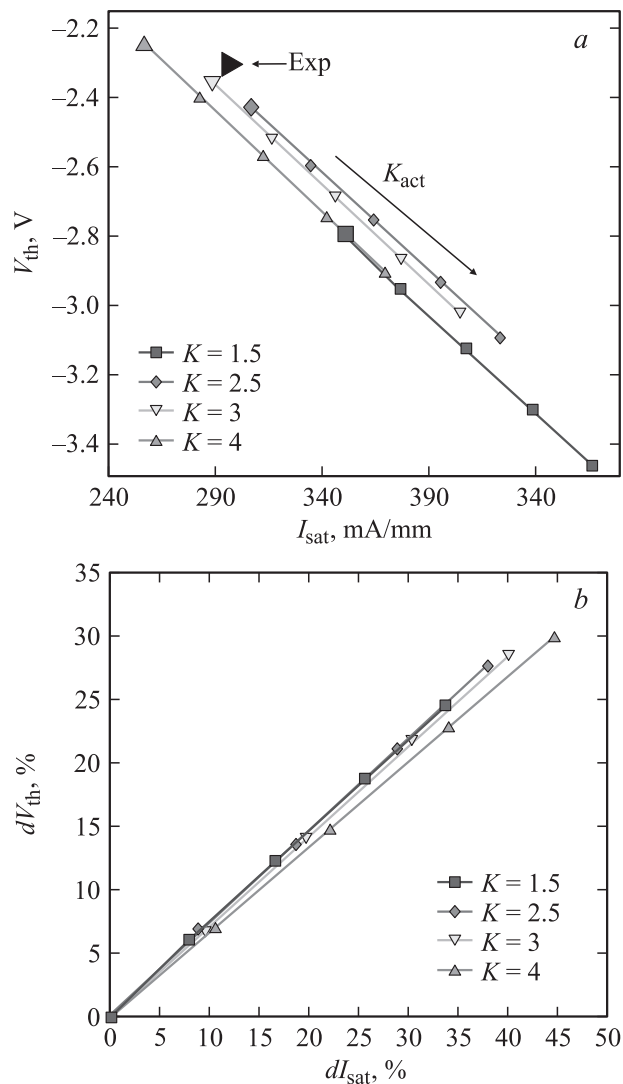
того, что хотя уменьшение ширины профиля не меняет средней напряженности электрического поля в канале, но изменяет его распределение таким образом, что у стоковой части затвора его напряженность возрастает, а в остальной части канала падает. В результате этого в области сильного электрического поля у края затвора начинается лавинная генерация носителей заряда, что увеличивает плотность заряда в канале и соответственно ток насыщения. Понижение скорости роста порогового напряжения также связано с увеличением плотности заряда в канале.

Для проверки степени влияния лавинной генерации на ток насыщения был проведен расчет в модели без генерации и рекомбинации носителей заряда. В этом случае ток насыщения при  $K = 4$  и ширине профиля, равной 0.062 мкм, уменьшился на 35.5% по сравнению с результатом, полученным в модели с теми же параметрами профиля, учитывающей генерацию и рекомбинацию. Такое уменьшение тока объясняется не только отсутствием сгенерированных неравновесных носителей заряда, но и снижением плотности носителей заряда в канале из-за захвата их на глубокие уровни. В модели с генерацией неравновесные носители заряда частично экранируют поле в канале, чего не происходит в модели без лавинной генерации. Возрастание электрического поля в канале приводит к выбросу части электронов в глубь подложки, где они захватываются на глубокие уровни. При  $K = 4$  на глубокие уровни захватываются около 30% носителей заряда из канала, что приводит к падению тока насыщения. Это подтверждается расчетами, проведенными с помощью еще более упрощенной модели, в которой отсутствуют не только генерация и рекомбинация носителей заряда, но и также практически отсутствует захват электронов на глубокие уровни в подложке. Для этого толщина подложки была сокращена до 0.2 мкм вместо обычных 2.5 мкм, что близко к толщине канала. Поэтому в этой модели захват электронов на глубокие уровни ограничен полной концентрацией этих уровней во всей тонкой подложке, и, как показывают расчеты, при всех коэффициентах компенсации все глубокие уровни заняты электронами. Результаты расчетов, полученные с использованием самой простой модели, можно увидеть на рис. 5, *a* (кривые под цифрой 2). На этом рисунке видно, что, хотя лавинная генерация в этой модели отсутствует, ток насыщения больше, чем в полной модели (с генерацией, рекомбинацией и подложкой толщиной 2.5 мкм), что объясняется большей плотностью заряда в канале из-за меньшего захвата электронов на глубокие уровни, которые в данном случае заполняются полностью, даже при  $K = 4$ . В модели с полной подложкой, как показывают расчеты, захват электронов происходит не только на глубокие уровни, находящиеся в канале, но и на глубокие уровни, находящиеся в подложке под каналом. Поэтому за счет захвата на эти уровни в подложке плотность заряда в канале значительно меньше, чем в канале транзистора, рассчитанного с помощью упрощенной модели.



### 3.3. Влияние коэффициента активации на характеристики транзистора

В данном разделе была определена зависимость тока насыщения и порогового напряжения от коэффициента активации имплантированной примеси при различных коэффициентах компенсации и при фиксированных значениях положения пика концентрации примеси и ширины профиля. Результаты расчетов представлены на



**Рис. 6.** *a* — значения порогового напряжения и тока насыщения при различных коэффициентах активации и различных значениях коэффициента компенсации ( $K$ ). Коэффициент активации варьировался от 0.8 до 1 с шагом 0.05. Направление увеличения коэффициента показано стрелкой с надписью  $K_{act}$ . Экспериментальные значения порогового напряжения и тока насыщения, равные 300 мА/мм и  $-2.3$  В соответственно, отмечены знаком Exp. Базовые значения коэффициента активации показаны значками увеличенного размера. *b* — значения относительного изменения порогового напряжения и относительного изменения тока насыщения при изменении коэффициента активации для различных коэффициентов компенсации ( $K$ ). Коэффициент активации варьировался от 0.8 до 1 с шагом 0.05.

рис. 6, *a*. Коэффициент активации варьировался от 0.8 до 1 с шагом 0.05. Положение пика профиля легирования при этом было равно 0.032 мкм, ширина профиля легирования — 0.068 мкм. По результатам расчетов, представленных на этом рисунке, наиболее близкие к экспериментальным значениям результаты получаются при коэффициентах компенсации, равных 2.5 и 3, и коэффициенте активации, равном 0.8. Полученные результаты достаточно ожидаемы и объясняются тем, что при увеличении коэффициента активации увеличивается плотность заряда в канале, что видно из формулы (3). Толщина канала при этом меняется незначительно (меньше чем на 2%). Это приводит к линейному возрастанию и тока насыщения, и порогового напряжения.

На рис. 6, *b* представлены результаты изменения коэффициента активации от 0.8 до 1 с шагом 0.05, при этом в каждой точке считалось изменение тока насыщения и порогового напряжения относительно их значений в начальной точке (коэффициент активации 0.8). С увеличением коэффициента активации от 0.8 до 1 при малых коэффициентах компенсации возрастание тока насыщения и порогового напряжения происходит в основном за счет увеличения плотности заряда в канале, примерно на 25% для всех коэффициентов компенсации. При коэффициенте компенсации, равном 4, начинает играть значительную роль лавинная генерация носителей заряда, которая появляется, как и в предыдущих случаях, из-за повышения напряженности электрического поля в канале. Также при повышении коэффициента компенсации с  $K = 1.5$  до  $K = 4$  толщина канала уменьшается на 14%, что приводит к тому, что скорость роста порогового напряжения увеличивается только на 5%, в то время как скорость роста тока насыщения увеличивается на 12%.

## 4. Заключение

С помощью численных компьютерных расчетов были найдены зависимости тока насыщения и пороговое напряжение арсенид-галлиевого транзистора с затвором Шоттки с ионно-легированным каналом от параметров профиля легирования канала. В результате были найдены параметры профиля легирования, при которых расчетные значения характеристик транзистора лучше всего совпадали с экспериментально измеренными значениями. Кроме того были исследованы физические процессы, определяющие характеристики транзистора при изменении параметров его профиля легирования и коэффициента компенсации подложки. Исследование этих процессов позволило определить, какой процесс преобладает при изменении каждого из параметров.

В результате расчетов было выяснено, что в случае варьирования положения максимума профиля легирования ток насыщения и пороговое напряжение линейно возрастают за счет увеличения толщины канала транзистора и повышения плотности заряда в нем. При увеличении коэффициента компенсации скорость роста этих характеристик увеличивается из-за повышения средней

подвижности и средней скорости насыщения электронов в канале. С уменьшением ширины профиля легирования при малых коэффициентах компенсации ток насыщения возрастает из-за повышения плотности заряда в канале, а пороговое напряжение уменьшается из-за сокращения толщины канала. При увеличении коэффициента компенсации на скорость изменения характеристик начинает оказывать влияние лавинная генерация носителей заряда. Для проверки степени ее влияния были проведены сравнения с расчетами, выполненными с помощью упрощенных моделей, не учитывающих генерации и рекомбинации носителей заряда, а также влияние подложки и захват носителей заряда на глубокие уровни, находящиеся в ней. В результате этого сравнения было выяснено, что модель без рекомбинации и генерации дает заниженные ток насыщения и пороговое напряжение, так как часть носителей из канала выбрасывается электрическим полем в подложку и захватывается там на глубокие уровни, а уменьшение плотности заряда ничем не компенсируется. Еще более упрощенная модель без генерации, рекомбинации и без учета подложки дает завышенные результаты из-за того, что захват на глубокие уровни практически отсутствует и плотность заряда в канале оказывается даже большей, чем в канале транзистора в присутствии лавинной генерации. При расчетах зависимости тока насыщения и порогового напряжения от коэффициента активации характеристики транзистора также линейно возрастают из-за повышения плотности заряда в канале при увеличении коэффициента активации. Толщина канала при этом почти не изменяется. При увеличении коэффициента компенсации появляется лавинная генерация носителей заряда и меняются скорости роста тока насыщения и порогового напряжения, но за счет уменьшения толщины канала с увеличением коэффициента компенсации пороговое напряжение растет медленнее.

По найденным зависимостям характеристик транзистора от параметров его профиля можно найти такой профиль, при котором характеристики транзистора будут оптимальными для определенной задачи — мощный транзистор, транзистор с высоким коэффициентом усиления — или какого-то компромиссного варианта.

Авторы выражают благодарность В.С. Арыкову и В.А. Кагадею (ЗАО НПФ „Микрон“) за представленные экспериментальные результаты и плодотворное обсуждение статьи.

## Список литературы

- [1] Б.И. Селезнев, В.А. Дмитриев, А.П. Штейнгарт. *Вестн. НовГУ*, **19**, 101 (2001).
- [2] <http://www.macomtech.com>
- [3] *Полевые транзисторы на арсениде галлия*, под ред. Д.В. ДиЛоренцо, Д.Д. Канделуола (М., Радио и связь, 1988). [Пер. с англ.: *GaAs FET Principles and Technology*, ed. by J.V. DiLorenzo, D.D. Khandelwal (Artech House Inc., 1982)].
- [4] R. Anholt, T.W. Sigmon. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **36** (2), 250 (1989).
- [5] B.L. Sharma. *Def. Sci. J.*, **39** (4), 353 (1989).
- [6] R. Anholt, P. Balasingam, S.Y. Chou, T.W. Sigmon. *J. Appl. Phys.*, **64** (7), 3429 (1988).
- [7] А.Ю. Бончик, И.И. Ижин, С.Г. Кияк, Г.В. Савицкий. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **3**, 3 (2005).
- [8] R. Anholt, T.W. Sigmon. *J. Electron. Mater.*, **17** (1), 5 (1988).
- [9] Tzu-Hung Chen, M.S. Shur. *IEEE Trans. Electron., Dev.*, **32** (1), 18 (1985).
- [10] M.B. Dutt, Ram Nat, R. Kumar, B.L. Sharma. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **36** (4), 765 (1989).
- [11] D. Pavlidis, J.-L. Cazaux, J. Graffeuil. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, **36** (4), 642 (1988).
- [12] TCAD Sentaurus Manual Version C-2009.06.
- [13] K. Blotekjaer. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **17** (1), 38 (1970).
- [14] А.М. Бобрешов, А.В. Дыбой, Ю.Н. Нестеренко, Ю.Ю. Разуваев. *Вестн. ВГУ. Сер. Физика. Математика*, № 1, 5 (2008).
- [15] М.С. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия*. [Пер. с англ. под ред. М.Е. Левинштейна и В.Е. Челнокова] (М., Мир, 1991).
- [16] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*, пер. с англ. под ред. Р.А. Сурица (М., Мир, 1984).
- [17] Y. Wada, M. Tomizawa. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **35** (11), 1765 (1989).

Редактор Т.А. Полянская

## Doping profile influence on characteristics of ion-implanted GaAs field effect transistor with the Schottky barrier

A.K. Shestakov, K.S. Zhuravlev

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** Ion-implanted GaAs MESFET was modeled and doping profile implanted through dielectric film was defined. Dependences of MESFET static characteristics on doping profile parameters were found and analyzed. Physical processes in transistor defined these characteristics were investigated. These dependences allow to optimize transistor for different applications (power, high frequency or low-noise transistors).