

**А.А. Ватюк**

## Моделирование параметров гетероструктурного полевого транзистора в среде Silvaco TCAD

Изучены основы приборно-технологического моделирования. Рассчитана и создана модель полевого транзистора, выполненного по рНЕМТ-технологии. Получены его вольт-амперные характеристики,  $S$ -параметры и произведена визуализация подзатворного рецесса. Приведено несколько примеров зависимости параметров транзистора от глубины травления.

**Ключевые слова:** рНЕМТ, травление рецесса, приборно-технологическое моделирование.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2016-19-1-69-72

### Актуальность использования приборно-технологического моделирования

Финансовые затраты в сфере производства микроэлектронных и полупроводниковых изделий порой бывают колоссальными. Исходный материал, технологическая линейка оборудования, коммуникации, энергоснабжение и расходы на многочисленный персонал – все это требует довольно серьезных денежных вложений. Поэтому очевидно, что все эти вложения стараются минимизировать любыми путями. Исходный материал (эпитаксиальные и гетероэпитаксиальные структуры) нередко составляет наибольшую долю расходов. Например, стоимость одной пластины с выращенной гетероструктурой GaN на подложке из SiC может достигать двухсот тысяч рублей. Часть пластин уходит на отработку различных технологических процессов: травление мезы или подзатворного рецесса, нанесение межуровневой изоляции и пассивирующего слоя, осаждение металлизации, различные ионные процессы. Для того чтобы не проводить эксперименты на дорогостоящих пластинах, прибегают к методам приборно-технологического моделирования.

Суть приборно-технологического моделирования состоит в том, что посредством программного пакета TCAD задаются параметры структуры – толщина слоев, уровни легирования, геометрия прибора. На выходе программы можно получить электрофизические параметры материала, зонные диаграммы, распределение концентрации носителей заряда. При наличии контактов на структуре несложно смоделировать характеристики на постоянном токе, распределение электрического потенциала или СВЧ-параметры устройства. Такой же подход применим к различным технологическим операциям. На входе задаем параметры того или иного процесса, а на выходе получаем результат выполнения операции, например внешний вид структуры или необходимые зависимости. Необходимо также отметить возможность расчета интегральных структур путем создания полноценного технологического маршрута в пределах одного проекта или симулирование прохождения по нему целой партии «виртуальных» пластин.

Очевидно, что приборно-технологическое моделирование способно довольно серьезно снизить

затраты полупроводникового производства и повлиять на себестоимость изделия, сделав его дешевле и привлекательнее для потребителя.

Целью данной работы является определение зависимости между выходными характеристиками полевого транзистора и глубиной подзатворного рецесса. Для этого была создана модель транзистора, выполненного по рНЕМТ-технологии. На входе задаются различные параметры прибора – толщины и уровни легирования эпитаксиальных слоев, особенности затвора, а на выходе получаем семейство необходимых характеристик в визуальном представлении.

### Основной этап работы и особенности модели

Для расчета характеристик полевого транзистора воспользуемся программным пакетом Silvaco TCAD [1]. Он позволяет осуществлять приборно-технологическое моделирование, давая возможность пользователям наблюдать за течением какого-либо процесса или получать характеристики полупроводникового прибора, исходя из заданных начальных условий. Данный пакет уже достаточно давно приобрел популярность среди разработчиков и технологов на ведущих предприятиях отрасли. В то же время большое количество встроенных модулей позволяет решать задачи в конкретных областях – будь то мощные приборы, светодиодные структуры или органические материалы. Условно все модули пакета можно разделить на две основные группы – модули, реализующие приборное моделирование (ATLAS, MERCURY) и технологическое (например, ATHENA).

К особенностям первой группы модулей относятся:

1. Большой выбор исходных полупроводниковых материалов (с возможностью добавления новых).
2. Визуализация процесса изготовления прибора и его конечное представление в виде 2D- или 3D-модели.
3. Достаточно простой ввод исходных данных, например геометрических размеров прибора или свойств электродов.
4. Быстрый и точный расчет выходных характеристик изделия с последующей оптимизацией параметров модели.

Модули технологического моделирования характеризуются следующими особенностями:

1. Большой выбор различных технологических процессов и соответствующих встроенных моделей – диффузия, ионная имплантация, травление, литография.

2. Большая скорость работы используемых аналитических моделей.

3. Возможность совместной работы со встроенными модулями приборного моделирования.

В данном случае для моделирования полевого гетероструктурного транзистора в среде Silvaco TCAD используется модуль MERCURY. Он создан конкретно для данного типа приборов, включает в себя большое количество физических моделей (ударная ионизация, туннельный ток, омические контакты и барьер Шоттки и др.). При этом модуль вполне хорошо взаимодействует с другими возможностями рабочей среды, будь то визуализация структуры или экстракция малосигнальных параметров транзистора, позволяя моделировать и решать несколько задач в рамках одного программного кода. Для расчета характеристик используется двумерная модель прибора. Если быть более точным, то MERCURY – это квазидвумерный симулятор, т.е. состоящий из двух одномерных симуляторов. Первый из них решает уравнение Пуассона перпендикулярно поверхности прибора в определенном диапазоне поверхностных состояний. Таким образом, описывается канальная область транзистора в одномерном пространстве. Второй решает уравнения транспорта носителей вдоль канала и рассчитывает выходные характеристики.

Известно, что на параметры транзистора влияет большое число факторов: последовательность эпитаксиальных слоев и их уровни легирования, качество контактов, геометрия рецесса и др. [2]. Формирование рецесса, иными словами, подзатворного углубления, является одной из наиболее критичных операций. Он определяет электрические параметры транзистора – ток насыщения, напряжения пробоя и величину отсечки. Если говорить точнее, то по мере увеличения глубины рецесса снижается ток насыщения транзистора (следовательно, ток потребления всей схемы) и увеличивается напряжение пробоя.

Основой процесса его формирования является жидкостное химическое травление слоев полупроводника за счет окислительно-восстановительной реакции. Физика травления достаточно сложна и практически не поддается моделированию, поэтому удобно оперировать одним из параметров рецесса – его геометрической формой. В гетероэпитаксиальных структурах рецесс формируется в барьерном слое с предварительным травлением контактного слоя. Для моделирования подзатворного углубления была выбрана довольно распространенная гетероструктура на подложке из GaAs. Контактный слой легирован на уровне  $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Барьерная область AlGaAs включает в себя  $\delta$ -легирование кремнием с концентрацией  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Содержание алюминия в твердом растворе AlGaAs равно 0,25, содержание индия в канальном слое InGaAs равно 0,22. Отметим

наличие двух буферных слоев и сверхрешетки GaAs/AlAs для снижения коэффициента шума транзистора. Представленная структура является типичной и довольно часто используется для изготовления малозумящих усилительных устройств [3]. Параметры слоев могут варьироваться в зависимости от конкретных задач разработчика, например, мольная доля индия в канальном слое влияет на коэффициент усиления и шум транзистора. Предназначение слоев и принцип работы полевого транзистора здесь описаны не будут, так как все это широко представлено в различных литературных источниках. Последовательность слоев структуры приведена ниже:

- 1) GaAs – контактный слой – с толщиной 45 нм.
- 2) AlGaAs – барьерный слой – 35 нм.
- 3) AlGaAs – спейсер – 3 нм.
- 4) InGaAs – канальный слой – 15 нм.
- 5) GaAs – второй буферный слой – 700 нм.
- 6) GaAs/AlAs – сверхрешетка – 20 нм.
- 7) GaAs – первый буферный слой – 700 нм.

Параметры затвора в данной модели – это его местоположение, ширина, длина и внутреннее смещение барьера Шоттки. По необходимости задачи данной работы можно расширить и определить влияние, например, ширины затвора на выходные характеристики транзистора или длины затвора на  $S$ -параметры в необходимом диапазоне частот. В этом плане модель является достаточно гибкой и удобной. Важно отметить, что затвор представлен в виде идеального барьера Шоттки, т.е. влияние технологических факторов (конкретные слои металлизации, их сопротивление и высота потенциального барьера) отсутствует. Длина затвора – 0,4 мкм, ширина – 100 мкм, внутреннее смещение – 0,75 эВ.

Единственный параметр, требующий пояснения в данном случае, – длина затвора. Величина 0,4 мкм была выбрана как стабильно достигаемая при должном уровне электронной гигиены на предприятии и качестве затворной литографии. Более того, в настоящее время существуют промышленно выпускаемые транзисторы с длиной затвора 150 нм и менее. И опять же модель позволяет эффективно работать с любой требуемой величиной. При этом для уточнения характеристик транзистора автоматически запускаются модели термоэлектронной и туннельной эмиссии. Но опять же необходимо уточнить, что сток и исток транзистора в данной модели задаются как идеальные омические контакты, обладающие линейной симметричной вольт-амперной характеристикой.

Таким образом, их электрофизические и технологические особенности (последовательность и толщины слоев, удельное контактное сопротивление) не учитываются. Результаты моделирования транзистора с разной глубиной рецесса при прочих постоянных параметрах представлены на рис. 1. Для более наглядного вида изменения глубины травления масштабирование выбрано таким образом, что сверхрешетка GaAs/AlAs и первый буферный слой GaAs скрыты от читателя. Все электроды транзистора (сток, исток, затвор) графически не обозначаются.

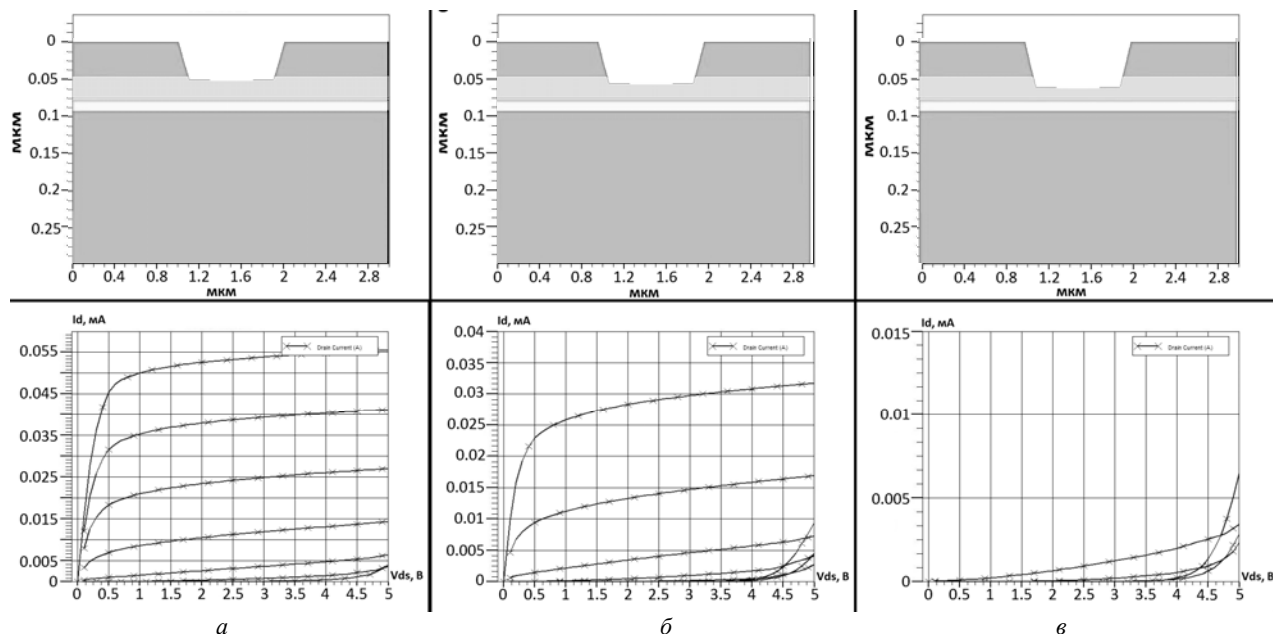


Рис. 1. Моделирование транзистора с разной глубиной рецесса: а – глубина равна 50 нм; б – 55 нм, в – 60 нм

Напряжение, подаваемое между затвором и истоком  $U_{gs}$  менялось в диапазоне от 0 до  $-1,2$  В с шагом  $0,2$  В. Предельное напряжение сток-исток  $U_{ds}$  составляло  $5$  В. Из рис. 1 видна закономерная зависимость характеристик от глубины рецесса. Ток насыщения снижается с увеличением глубины травления. При достижении глубины в  $60$  нм канал транзистора полностью перекрывается областью пространственного заряда. В первом случае ток насыщения составил  $55$  мА, во втором – около  $30$  мА. Отсечка изменилась с  $-1$  до  $-0,6$  В. Пробой наступал в районе  $\sim 4,5$  В. Время расчета ВАХ составило  $\sim 45$  с. Очевидно, что глубина рецесса более  $55$  нм недопустима для данной структуры или структуры с подобной конфигурацией используемых слоев.

Теоретически результаты моделирования согласуются с литературными источниками. Для подтверждения этого опять же обратимся к Ди Лоренцо

[2]. И хотя данное пособие не охватывает область гетероструктурных транзисторов, механизм формирования рецесса схож с MESFET-структурами. Стоит дополнить, что характер травления подзатворного углубления модели аналогичен реальным технологическим процессам, выполняемым лично автором.

Как уже было сказано выше, модель транзистора достаточно гибкая и позволяет получать зависимость не только вольт-амперных характеристик от глубины и геометрии рецесса, но и сверхвысокочастотные  $S$ -параметры в необходимом диапазоне частот. По умолчанию  $S$ -параметры выводятся на диаграмме Вольперта–Смита. Для демонстрации данной возможности был смоделирован транзистор с длиной затвора  $0,35$  мкм, шириной  $100$  мкм и глубиной рецесса  $55$  нм. Параметры эпитаксиальных слоев прежние. Вид полученных  $S$ -параметров в диапазоне  $1$ – $20$  ГГц представлен ниже (рис. 2).

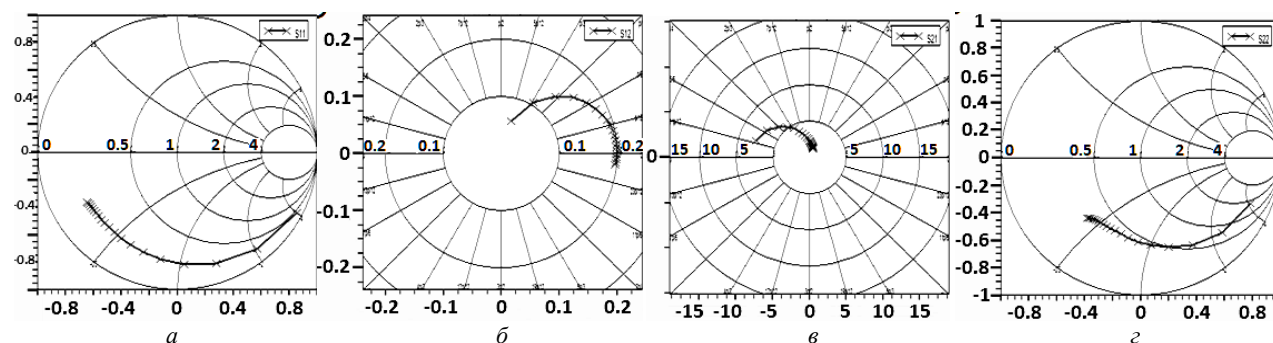


Рис. 2. Полученные  $S$ -параметры транзистора: а –  $S_{11}$ ; б –  $S_{12}$ ; в –  $S_{21}$ ; г –  $S_{22}$

На диаграмме можно видеть взаимосвязь коэффициента отражения транзистора и импеданса: по оси абсцисс отложена вещественная часть коэффициента отражения, а по оси ординат – мнимая. Импеданс нанесен сеткой и представлен в виде нормированного сопротивления, представленного в сумме

активного и реактивного сопротивлений. Благодаря такому представлению можно пересчитать коэффициент отражения в нормированное значение сопротивление, найдя ближайшие к интересующей точке окружности постоянного активного и реактивного сопротивления. Стоит отметить, что  $S$ -параметры

можно выводить и сохранять в текстовом виде, например, в формате \*s2p, а затем они интегрируются в САПР автоматизированного проектирования СВЧ-устройств. Оценить точность полученных значений без корреляции с реальными тестовыми структурами не представляется возможным. Время расчета составило ~120 с.

#### **Заключение**

В результате проделанной работы была создана модель полевого транзистора в среде Silvaco TCAD. Модель включает в себя набор различных входных параметров (длина и ширина затвора, глубина и геометрия рецесса, параметры эпитаксиальных слоев), а на выходе реализует ВАХ устройства, S-параметры и визуализирует структуру. Модель решает главную задачу выполняемой работы, а именно, описывает зависимость выходных характеристик от глубины рецесса.

Однако существенным недостатком разработанной модели является отсутствие возможности задания формы затвора (трапециевидный, Т-образный и др.), которая вносит существенный вклад в работу прибора.

Логично будет продолжить отладку имеющейся модели с помощью формирования тестовых структур, включающих в себя набор транзисторов с различной шириной затвора, непосредственно на пластине и сравнить характеристики «реальных» и «виртуальных» приборов.

#### *Литература*

1. Silvaco Device Simulation Framework [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.silvaco.com/products/tcad/device\\_simulation/device\\_simulation.html](http://www.silvaco.com/products/tcad/device_simulation/device_simulation.html), свободный (дата обращения: 08.10.2015).
2. Ди Лоренцо Д.В. Полевые транзисторы на арсениде галлия / Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола. – М.: Радио и связь, 1988. – 211 с.
3. Fabrication and characteristics of extremely low-noise AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorphic HEMT's / Hyung-Sup Yun, Jin-Hee Lee // Journal of the Korean Physical Society. Vol. 33, № 3. P. 741–744.

---

#### **Ватюк Антон Андреевич**

Магистрант каф. физической электроники ТУСУРа  
Тел.: 8-961-890-22-04  
Эл. почта: meo-dmt@yandex.ru

Vatyuk A.A.

#### **Modeling of GaAs pHEMT parameters in Silvaco TCAD**

Silvaco TCAD system was studied. The model of GaAs pHEMT was obtained. IV curves and S-parameters of this device were received.

**Keywords:** GaAs pHEMT, TCAD, recess etching.