

Проблемы численного моделирования емкостного профилирования гетеропереходов в полупроводниках

Е.В. Бувайлик¹, Я.Б. Мартынов¹, А.Л. Курапова²

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина»

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Аннотация: в данной работе этапы емкостного профилирования гетероперехода были имитированы с помощью численного моделирования. Показано, что для восстановления профиля заряда в гетеропереходе необходимо получение решений численных уравнений с очень высокой точностью, требующих больших затрат машинного времени. Это связано с отсутствием электрического контакта двумерного электронного газа с металлом омического электрода. Показано, что установление необходимого контакта приводит к заметному изменению в распределении концентрации двумерного электронного газа.

Ключевые слова: численное моделирование, полупроводниковые гетероструктуры, емкостное профилирование

1. Введение

Современные мощные радиоэлектронные приборы создаются на базе многослойных полупроводниковых гетероструктур, в состав которых могут входить нанометровые слои с высокой степенью легирования. Тестирование таких структур становится всё более сложной задачей для применяемых в этом случае приближённых аналитических методов. В настоящей работе продемонстрированы некоторые проблемы, с которыми приходится сталкиваться при емкостном профилировании гетеропереходов. Все этапы емкостного профилирования гетероперехода были имитированы с помощью следующей процедуры: для заданного модельного профиля концентрации доноров в гетероструктуре была рассчитана вольт-фарадная характеристика; затем с помощью обычной процедуры восстановлен профиль заряда и проведено сравнение рассчитанного и модельного профиля заряда.

2. Задание топологии полупроводниковой гетероструктуры для численного эксперимента

Для начала необходимо задать геометрию рассчитываемой области. Пусть необходимо проанализировать распределение заряда в гетероструктуре, составленной из нескольких различных полупроводниковых материалов, и мы хотим рассчитать емкость затвор-исток для системы электродов (рис.1). Для этой цели было использовано численное решение системы уравнений так называемой гидродинамической модели [1], полученное с помощью комплекса программ «FET» [2].

Заметим, что в этой структуре омические электроды истока и стока лежат на изолирующем материале $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ и поэтому плохо контактируют с двумерным электронным газом, возникающим на границах широкозонного AlN . Заряд затвора рассчитывался путём численного интегрирования нормальной к нему производной электрического поля (E)

$$Q_z = \sum \varepsilon \varepsilon_0 E \cdot h, \quad (1)$$

где ε , ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника и абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, h – шаг разностной сетки вдоль

затвора. Емкость определялась с помощью численного дифференцирования заряда затвора:

$$C = \frac{\Delta Q_z}{\Delta U_{зп}}, \quad (2)$$

а профиль «заряженной примеси» восстанавливался с помощью обычно применяемых в емкостном профилировании легированных многослойных гетероструктур формул: для концентрации «заряженной примеси» (N)

$$N(w) = \frac{1}{q \varepsilon_n S^2 \left(\frac{1}{C}\right)} \cdot \frac{\partial U}{\partial \left(\frac{1}{C}\right)}, \quad (3)$$

и глубины залегания примеси (w)

$$w = \frac{\varepsilon_n S}{C} + \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_i}\right) w_i, \quad (4)$$

где i - номер слоя на глубине w , q - заряд электрона, ε_i - диэлектрическая проницаемость i -го слоя, w_i - толщина i -го слоя, S - полная площадь затвора, а $C(U)$ - измеренная вольт-фарадная характеристика [3].

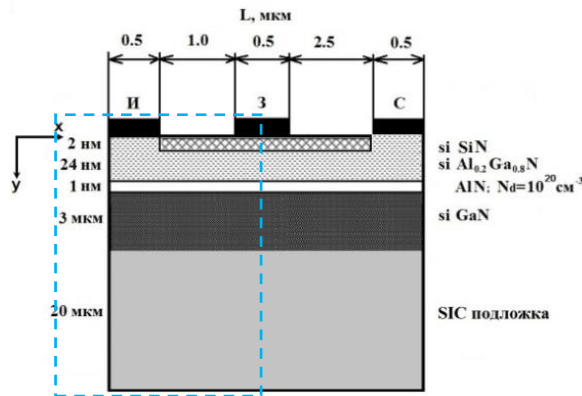


Рисунок 1. Поперечное сечение транзистора и область (пунктир), в которой решаются уравнения переноса подвижных зарядов [1]. Нумерация слоёв начинается с 1 от подзатворного слоя.

Заметим, что для корректного восстановления профиля «заряженной примеси» многослойной гетероструктуры необходимо знать, в каком именно слое лежит граница обеднённой электронами области. В этом заключается первая проблема.

3. Емкостное профилирование гетероперехода

На рис.2 приведена рассчитанная по указанной выше схеме зависимость заряда затвора от разности потенциалов затвор-исток с шагом 0.5 В.

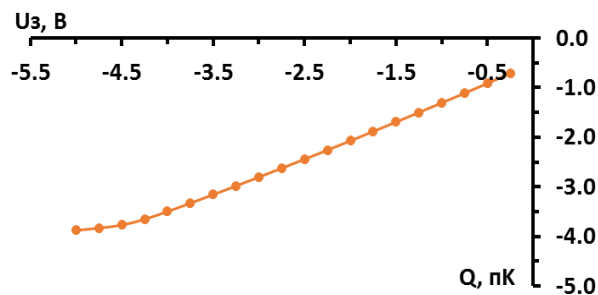


Рисунок 2. Рассчитанная зависимость заряда затвора от разности потенциалов затвор-исток с шагом 0.5 В.

Несмотря на видимую плавность кривой на рис.2, полученная с помощью численного дифференцирования по формуле (2) вольт-фарадная характеристика может иметь ощутимый численный шум. Для того, чтобы получить гладкую кривую $C(U_z)$, необходимо численное решение разностных уравнений с высокой и одинаковой для всех напряжений затвора точностью (рис.3).

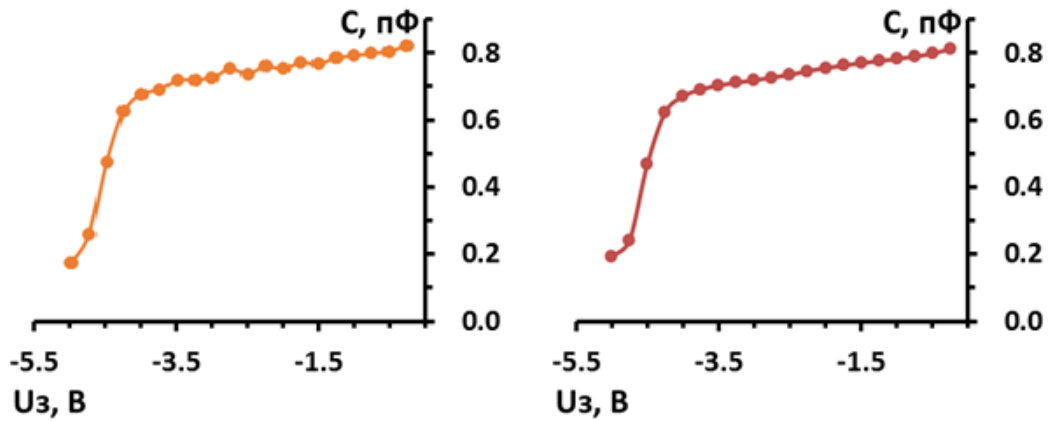


Рисунок 3. Вольт-фарадная характеристика, полученная с помощью численного дифференцирования по формуле (2). Точность для всех U_z (а) – различалась в разы, (б) – одинакова (различие ~1%).

Как показали исследования, это связано с тем, что из-за упомянутого ранее плохого контакта электродов истока и стока с двумерным электронным газом практически невозможно достичь полного установления переходного процесса из-за требуемого чрезмерно большого счётного времени. Профиль «заряженной примеси», полученный из формул (3), (4) и рассчитанной по ёмкости, изображённой на рис.3, совершенно не похож на модельный профиль, изначально заложенный в расчёт, а, скорее, напоминает распределение электронной плотности в гетероструктуре (рис.4).

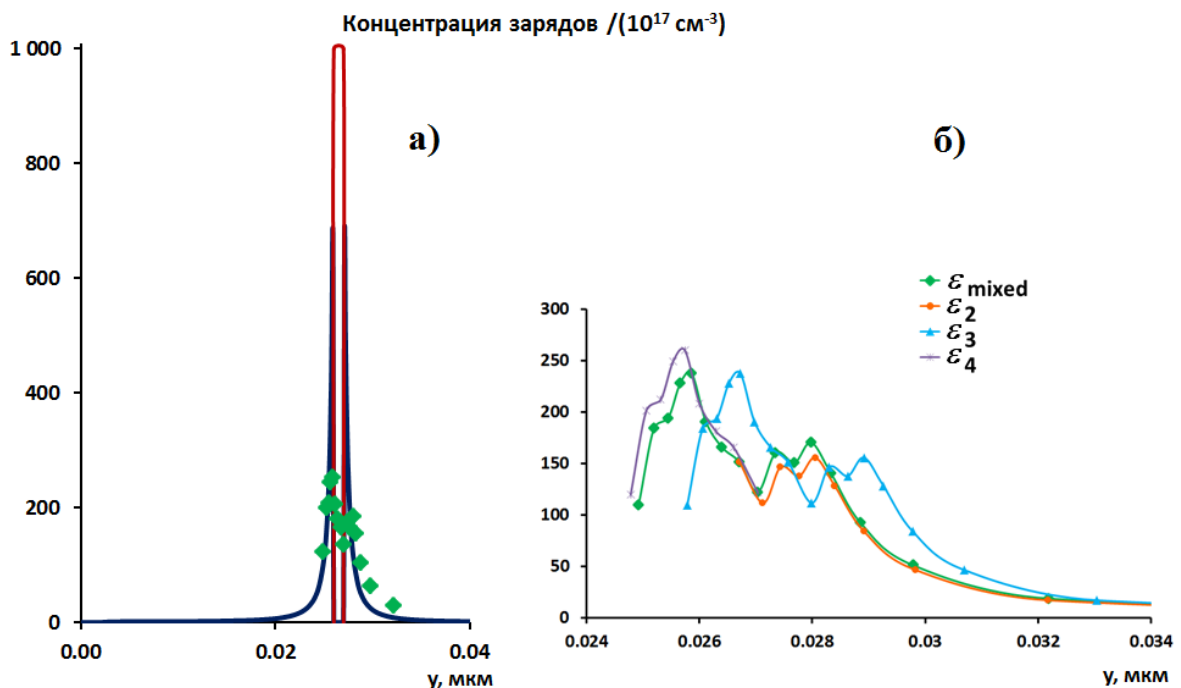


Рисунок 4. Заданная концентрация донорной примеси (красная линия); рассчитанная электронная плотность (сплошная синяя линия) в структуре, показанной на рис.1. Восстановленный по формулам (3, 4) профиль заряда: известная зависимость $\varepsilon(y)$ (зелёные ромбы) (а, б); $\varepsilon(y) = \varepsilon_2$ – оранжевые точки, $\varepsilon(y) = \varepsilon_3$ – голубые треугольники, $\varepsilon(y) = \varepsilon_4$ – фиолетовые крестики (б).

Правильное распределение концентрации соответствует зелёной кривой с ромбами (рис.4, $\varepsilon_{\text{mixed}}$). Ближе всего к правильной можно считать оранжевую кривую (соответствует ε_2). Поэтому при профилировании лучше брать значение ε слоя, ближайшего к предполагаемому максимуму заряда.

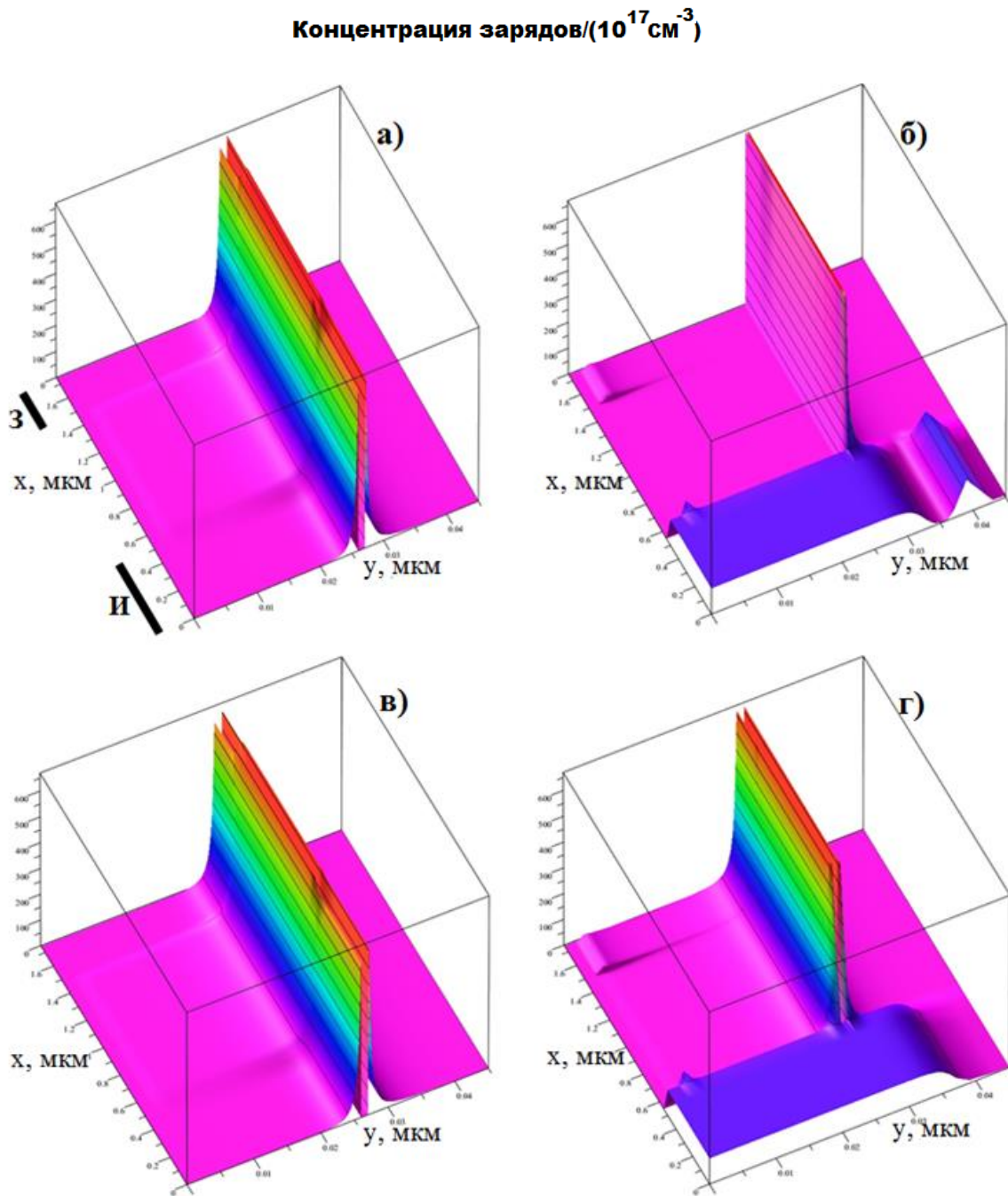


Рисунок 5. Рассчитанные с помощью модели [1] распределения электронной плотности в сечении моделируемых приборов. Транзисторы с двумя потенциальными ямами разной (а, б) и одинаковой (в, г) глубины.

Попытка улучшить контакт электродов истока и стока с двумерным электронным газом путём дополнительного легирования контактных областей привела к заметному искажению профиля заряда в «измеряемой» модельной структуре (рис.5 а, б). По-видимому, закоротка двух слоев с 2D- газом приводит к перетеканию электронов из менее глубокой потенциальной ямы в более глубокую. Действительно, такое искажение возникает лишь в структуре с разной глубиной потенциальных ям, расположенных по обе стороны от слоя AlN. Если слой $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ в структуре, показанной на рис. 1, заменить на слой GaN, то глубина упомянутых потенциальных ям будет одинакова, и тогда контакт двумерного электронного газа с металлом истока и стока не сказывается на исходной концентрации электронов в слоях (рис.5 в, г).

4. Заключение

В результате проведённого численного эксперимента выявлены следующие проблемы:

- 1) Для получения *гладкой* кривой $C(U_z)$ необходимо численное решение разностных уравнений с высокой и *одинаковой для всех напряжений затвора* точностью в структурах, где отсутствует контакт двумерного электронного газа с металлом электродов.
- 2) Создание контакта двумерного электронного газа с металлом электродов приводит к большим искажениям электронной плотности, если исходная структура имеет 2 потенциальные ямы с разной глубиной. Электроны из менее глубокой потенциальной ямы перетекают в более глубокую.
- 3) При профилировании лучше брать значение ε слоя, ближайшего к предполагаемому максимуму заряда.

Список литературы

1. Мартынов, Я. Б. Специальный вид граничных условий для системы уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы / Я. Б. Мартынов // ЖВМ и МФ. — 1999. — Т. 39. — №2. — С. 309-314.
2. Мартынов, Я.Б. Программа расчета характеристик полевого транзистора с затвором Шотки, основанная на двумерной численной модели / Я. Б. Мартынов // Электронная техника. — Серия СВЧ техника. — 1985. — Вып. 9. — С. 70-72.
3. Зубков, В. И. Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса / В. И. Зубков. — Санкт-Петербург: изд. «Элмор». — 2007.