

*Иванова Я.В., Яковлев Г.Е., Зубков В.И.  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

## **Эмиссионные процессы взаимодействия квантовой ямы с донорным дельта-слоем в рНЕМТ гетероструктурах**

*В настоящей работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование рНЕМТ гетероструктур с квантовой ямой AlGaAs/InGaAs/GaAs, используемых для изготовления транзисторов, работающих в частотном диапазоне 4-18 ГГц. Проведена модернизация установки электрохимического вольт-фарадного профилирования, с помощью которой впервые в эксперименте удалось наблюдать концентрационный пик от приповерхностного дельта-слоя рНЕМТ структуры. С помощью численного моделирования путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона определен профиль дна зоны проводимости и рассчитаны уровни размерного квантования. Экспериментально и теоретически проанализировано влияние положения дельта-слоя на глубину залегания уровней и концентрацию носителей в КЯ.*

**Ключевые слова:** Электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, рНЕМТ, квантовая яма, GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs, туннелирование, самосогласованное решение уравнений Шредингера и Пуассона

### **1. Введение**

Полевые транзисторы с двумерным электронным газом (ДЭГ) высокой плотности (НЕМТ) относятся к быстродействующим активным элементам микроэлектроники. Регулярно появляются сведения о достижении новых рекордов, связанных с совершенствованием технологии и использованием новых материалов. В настоящей работе представлены результаты исследования структур отечественных арсенидгаллиевых псевдоморфных (рНЕМТ) транзисторов, предназначенных для работы на частотах 4–18 ГГц (усилители, смесители, умножители частоты, управляющие устройства и т.д.) [1].

Полупроводниковые гетероструктуры (ГС) для современных рНЕМТ приборов представляют собой набор эпитаксиальных слоев из неоднородно легированных материалов различного состава. Совершенствование таких приборов приводит к ужесточению требований к точности воспроизводства последовательности слоев, их состава и степени легирования. Кроме того, возникает необходимость создания резких скачков концентрации примеси. Все это требует проведения тщательного контроля параметров на различных стадиях технологического процесса. Особенно важно контролировать распределение примеси и основных носителей заряда [2]. Приводятся данные измерений методом ECV-профилирования концентрационных пиков основных носителей заряда по глубине серии рНЕМТ структур, выращенных на подложках GaAs.

При использовании дельта-легированного слоя важное значение имеет эмиссионное взаимодействие между ним и квантовой ямой (КЯ). Существует два механизма эмиссии – термополевая и туннельная. Разделение влияния каждого из них представляет комплексную задачу и будет рассмотрено в следующих работах. В частности, расчет туннельной составляющей численно может быть проведен в соответствии с методикой, описанной в [3]. Для определения влияния дельта-слоя на основные параметры КЯ в настоящей работе

проведено численное моделирование таких параметров, как профиль потенциала краев разрешенных зон, разрыв зон, положение уровней размерного квантования, концентрационные профили носителей заряда и др. Расчет производился в квантовом ящике путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона в соответствии с алгоритмом, изложенным в [4].

## 2. Исследуемые образцы и техника эксперимента

Исследовался набор рНЕМТ гетероструктур, содержащих квантовую яму AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращенных на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии в АО «Светлана–Рост», С.-Петербург. Образцы представляли собой односторонние дельта-легированные GaAs рНЕМТ ГС для малошумящих усилителей. Концентрация примеси в донорном слое образцов в процессе роста задавалась на уровне  $2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Использование дельта-слоя в качестве донорного слоя позволяет, по сравнению с объемным легированием, при сохранении рабочих характеристик прибора получить большее значение крутизны и повысить управляемость транзистора [5]. Это также способствует уменьшению напряжения отсечки. Квантовая яма Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs располагалась на глубине 42 нм и имела ширину 14 нм.

Измерения концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) по глубине структуры проводились при комнатной температуре с использованием профилометра ECVPro (Nanometrics). Водный раствор 0.2М Тайрона использовался для образования электролитического выпрямляющего контакта площадью 0.1 см<sup>2</sup>. При ECV профилировании шаг травления составлял 1 нм. Частота и амплитуда переменного тестового сигнала составляли 300 Гц и 10 мВ соответственно. Ток травления поддерживался на уровне 0.5 мА/см<sup>2</sup>. В ряде экспериментов для измерения вольт-фарядных характеристик использовался LCR-измеритель Agilent E4980A, который подключался к электрохимической ячейке установки ECVPro через специально изготовленный блок реле [6].

Известно, что электрохимическое травление каждого слоя рНЕМТ транзистора происходит с разной скоростью. Поэтому в процессе ECV травления важно проверять количество стравленного материала на этапах измерения [7]. Использование атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver NEXT (NT-MDT) для контроля глубины и качества травления [6] обеспечило в настоящей работе выбор оптимальных параметров измерений.

Моделирование проводилось с использованием алгоритма самосогласованного решения системы уравнений Шредингера и Пуассона, реализованного в квантовом ящике [7]. Первая серия данных была получена для структуры с одиночной КЯ, а вторая – для системы КЯ + дельта-слой. Основные теоретические выводы получены путем сравнения полученных результатов по двум сериям.

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На сегодняшний день классическим методом вольт-фарядного профилирования наблюдался только один пик на концентрационном профиле рНЕМТ-структур, приписываемый области КЯ (ДЭГ канала) [8]. В наших экспериментах впервые наблюдались два пика: отклик от дельта-слоя и от КЯ (рис. 1). Возможность наблюдения двух пиков в измерениях объясняется тем, что используемый нами жидкий электролит создает на поверхности меньший выпрямляющий барьер по сравнению с металлическим контактом при классическом вольт-фарядном профилировании, поэтому исходная (при  $U = 0$ ) ширина области объемного заряда (ООЗ) оказывается меньше [9]. Для подтверждения этого была проведена оценка высоты барьера. Анализ вольт-амперных и вольт-фарядных характеристик структур на основе арсенида галлия различного уровня легирования в контакте с электролитом Тайрон различной концентрации позволил построить

соответствующие номограммы высоты барьера Шоттки на границе раздела полупроводник/электролит (вставка на рис. 1). Заметно, что при концентрации  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  выигрыш в меньшей высоте барьера (разница  $\sim 0.25 \text{ эВ}$ ) при использовании электролита выражается в уменьшении исходной ширины ООЗ под барьером на величину  $\sim 20 \text{ нм}$ , что как раз соответствует области расположения донорного дельта-слоя относительно КЯ.

Наблюдаемый профиль распределения концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) исследуемого образца хорошо коррелирует с данными, представленными технологами. На нижней вставке рис. 1 также представлен профиль распределения концентрации, построенный в более широком диапазоне по координате (до  $100 \text{ мкм}$ ). Видно, что после отклика от КЯ наблюдаемое значение концентрации монотонно убывает согласно дебаевскому размытию [10] при переходе к полуизолирующей подложке с концентрацией по данным метода ECV на уровне  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , что является рекордным достижением по измерению концентрации ОНЗ в полупроводнике емкостным методом [11]. Помимо резкого уменьшения значения емкости, которое становится сравнимым с уровнем шума, сложность измерения слаболегированных слоев обусловлена еще и тем, что толщина ООЗ становится сравнима с толщиной образца.

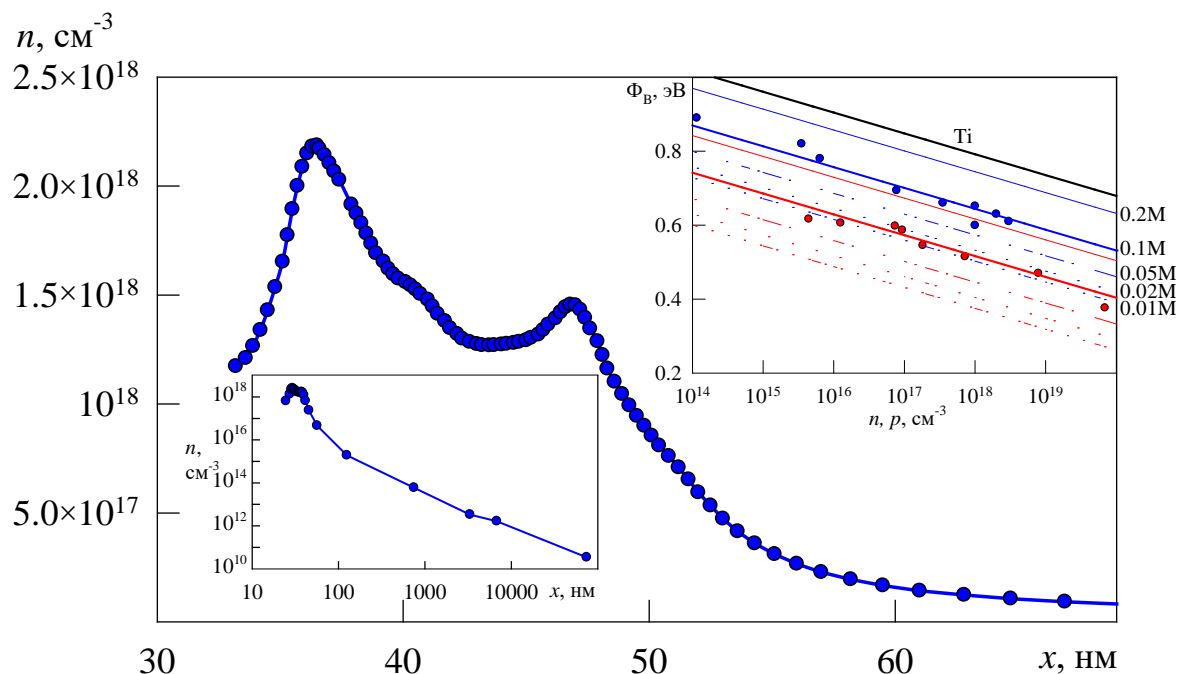


Рис. 1. Профиль распределения концентрации основных носителей заряда в исследуемом GaAs рНЕМТ образце с дельта-легированным слоем и зависимость высоты барьера Шоттки на границе раздела полупроводник/электролит

Моделирование квантовых эффектов проводилось, как отмечалось, в пределах искусственно выбираемого квантового ящика, ширина которого должна быть в несколько раз больше расстояния между КЯ и дельта-слоем. Положение уровня Ферми определялось относительно объемной электронейтральной части образца. Для исследования перераспределения носителей заряда между КЯ и дельта-слоем с изменением температуры проводились С-V измерения модельных структур, содержащих КЯ InGaAs шириной  $10 \text{ нм}$  и дельта-слой примеси углерода, удаленный от КЯ на  $13 \text{ нм}$ . Образцы получены в НИФТИ ННГУ методом MOCVD при атмосферном давлении водорода – газа-носителя паров MOC. По экспериментальным С-V характеристикам были определены профили концентрации основных носителей заряда при соответствующих температурах (Рис. 2).

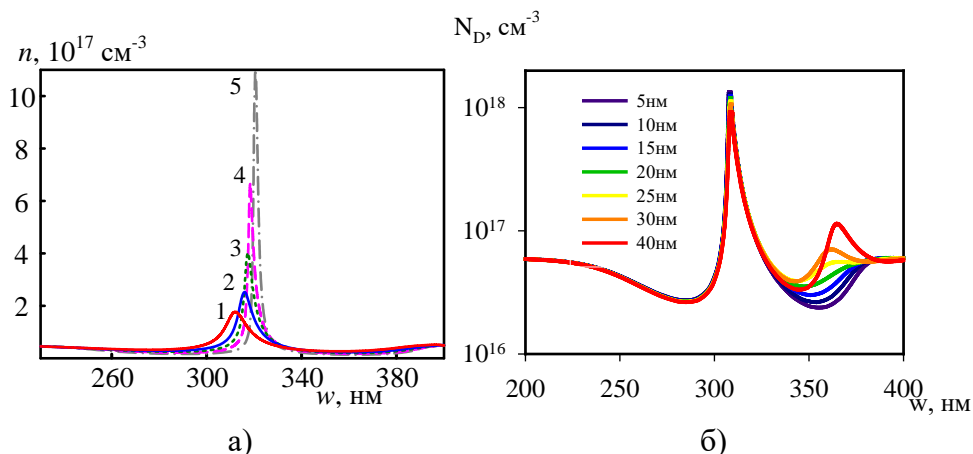


Рис. 2 а) наблюдаемый профиль концентрации основных носителей заряда в модельной ГС с КЯ InGaAs/GaAs ( $x = 0.225$ , ширина ямы 7.4 нм) при различных температурах, К: 1 – 300, 2 – 250, 3 – 200, 4 – 155, 5 – 75; б) моделирование наблюдаемого профиля концентрации носителей заряда для структуры с КЯ и дельта-слоем углерода при различных расстояниях между ними ( $T = 200$  К)

Для структуры с одиночной КЯ InGaAs/GaAs увеличение температуры от 75 до 250 К приводило к значительному (порядка 5 раз) уменьшению концентрации основных носителей заряда в КЯ (рис. 2а), что, как указывалось выше, связано с увеличением вероятности термоактивационного выброса носителей заряда из КЯ при повышении температуры. Для структуры с КЯ и дельта-легированным слоем наблюдается более слабое (менее 2-х раз) уменьшение амплитуды наблюдаемой концентрации основных носителей заряда при повышении температуры от 75 до 250 К. Это является следствием того, что дельта-слой углерода, расположенный рядом с КЯ, является эффективным поставщиком носителей заряда для КЯ. Это ослабляет температурную зависимость концентрации носителей заряда, поскольку с повышением температуры наряду с увеличением вероятности термоактивированного выброса носителей из КЯ увеличивается вероятность захвата носителей из дельта-слоя в результате уменьшения степени локализации носителей заряда в области дельта-слоя.

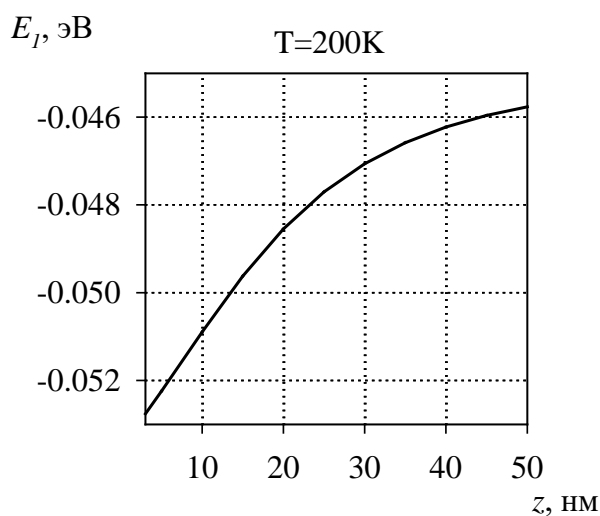


Рис. 3. Зависимость положения уровня размерного квантования в структуре с квантовой ямой InGaAs/GaAs и дельта-слоем углерода в зависимости от их взаимного расстояния.  $T = 200$  К, ширина квантовой ямы 10 нм

Моделирование показало также, что при определенном расстоянии от КЯ до дельта-слоя (порядка 25 нм для рассмотренного случая КЯ шириной 10 нм и разрывом зоны проводимости 175 мэВ) на концентрационных зависимостях разрешаются отдельные пики для КЯ и дельта-слоя (рис. 26). При уменьшении расстояния между КЯ и дельта-слоем наблюдается уменьшение величины пика от дельта-слоя и увеличение величины пика от КЯ, что связано с захватом носителей заряда ямой.

Наличие дельта-легированного слоя рядом с КЯ не только влияет на заполнение ее носителями заряда, но также оказывает влияние на положение уровней квантования в ней. На рис. 3 представлена зависимость положения основного уровня квантования от расстояния между КЯ и дельта-слоем, полученная при моделировании.

## Заключение

В результате исследований установлено, что при расстоянии между КЯ и дельта-слоем порядка не более одной–двух дебаевских длин дельта-слой является эффективным поставщиком носителей заряда в область КЯ. При этом видоизменяется потенциал в области КЯ и происходит изменение положения уровней квантования, а заполнение квантовой ямы носителями заряда оказывается слабо зависящим от температуры. Выполненная модернизация экспериментальной установки позволила впервые зарегистрировать методом ECV-профилирования отдельные концентрационные пики от КЯ и дельта-слоя в структурах рНЕМТ.

Исследование частично выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (Договор №12063ГУ/2017 от 14.07.2017).

## Библиографический список

1. Г.Е. Яковлев, Д.С. Фролов, В.И. Зубков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. — Т. 1. — СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. — С. 15–18.
2. М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, А.В. Рыков [и др.] // ЖТФ. — 2017. — Т. 87, № 10. — С. 1539–1544.
3. Я.В. Иванова, В.И. Зубков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018.
4. Зубков, В.И. // ФТП, Т. 41, Вып. 3, 2007, с. 331–337.
5. Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". — 2017. — № 10. — С. 5–12.
6. D.S. Frolov, V.I. Zubkov // *Semicond. Sci. Technol.* — 2016. — Vol. 31, no. 12. — P. 125013.
7. А.Л. Дудин, М.С. Миронова, Г.Е. Яковлев [и др.] // Прикладная физика. — 2017. — № 3. — С. 78–84.
8. Д.С. Фролов, Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков [и др.] // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". — 2016. — № 2. — С. 6–11.
9. V.I. Zubkov, M.A. Melnik, A.V. Solomonov [et al.] // *Phys. Rev. B.* — 2004. — Vol. 70, no. 7. — P. 075312.
10. Е.А. Тарасова, Е.С. Оболенская, А.В. Хананова [и др.] // ФТП, 50, 1599 (2016).
11. Г.Е. Яковлев, М.В. Дорохин, В.И. Зубков [и др.] // ФТП. — 2018. — Т. 52, № 8. — С. 873–880.
12. Г.Е. Яковлев, Д.С. Фролов, А.В. Зубкова [и др.] // ФТП. — 2016. — Т. 50, № 3. — С. 324–330.
13. Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". — 2017. — № 10. — С. 5–12.