

**Яковлев Г.Е., Фролов Д.С., Зубков В.И.**  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»

## **Диагностика GaAs pHEMT гетероструктур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования**

*Методами электрохимического вольт-фарадного профилирования исследовались полупроводниковые pHEMT гетероструктуры на основе квантовой ямы InGaAs/GaAs/AlGaAs. Определены профили концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктуры, плотность двумерного электронного газа в квантовой яме, а также положение эмиттерной области и квантовой ямы.*

**Ключевые слова:** Электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, pHEMT, квантовая яма, GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs.

### **1. Введение**

При разработке эпитаксиальных структур для псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT) важно соблюдать баланс между концентрацией примеси в сильнолегированном слое, определяющем 2D-концентрацию электронов в канале, и толщиной нелегированного слоя, определяющего подвижность носителей заряда и быстродействие прибора [1, 2]. В противном случае существует вероятность шунтирования канала сильнолегированными областями. Поэтому при оптимизации pHEMT структур важно контролировать как распределение примеси, так и распределение свободных носителей заряда по глубине гетероструктуры [3].

Метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV) позволяет получить информацию как о распределении примеси, так и о концентрации основных носителей заряда [4]. Метод ECV входит в стандарты международной ассоциации поставщиков полупроводниковой промышленности SEMI и успешно применяется для исследования HEMT структур [5]. Измерение однородно-легированных полупроводниковых структур ECV-методом хорошо отработано и представляет собой достаточно рутинную задачу. В то же время при ECV исследованиях современных многослойных pHEMT структур оказывается необходимым тщательный подбор параметров травления [6] и выбор рабочей точки измерения.

В данной работе приводятся результаты измерения методом ECV-профилирования профилей концентрации основных носителей заряда по глубине нескольких pHEMT структур, выращенных на подложках GaAs. Анализ и моделирование позволило уточнить толщины и положение сильнолегированных эмиттерных областей, а также значения плотности носителей заряда в квантовой яме.

### **2. Исследуемые образцы и техника эксперимента**

Исследовался набор из пяти pHEMT гетероструктур, содержащих квантовую яму InGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенных на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Образец № 1 представлял собой просто полуизолирующую подложку GaAs с выращенным на поверхности сильнолегированным

эпитаксиальным слоем GaAs *n*-типа и использовался в качестве тестового для отработки режимов измерений. Образцы № 2–5 представляли собой стандартные InGaAs/GaAs/AlGaAs рНЕМТ структуры, некоторые из них (№№ 3–5) не имели верхних сильнолегированных слоев. Образцы №№ 2 и 3 имели двухстороннее легирование в окрестностях квантовой ямы (КЯ), в то время как образцы №№ 4 и 5 имели только один эмиттерный слой с меньшим уровнем легирования, в остальном структуры были идентичны. КЯ In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs располагалась на глубине 54.5 нм (образцы №№ 2–5) и имела ширину 12 нм.

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

Послоевая структура рНЕМТ транзисторов состоит из множества слоев различных материалов, электрохимическое травление которых происходит с разной скоростью. Поэтому в процессе ECV травления важно проверять количество стравленного материала на разных этапах измерения. Использование атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver NEXT (NT-MDT) для контроля глубины и качества травления [7] обеспечило в настоящей работе выбор оптимальных параметров измерений.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Для подбора оптимального электролита и отработки режимов измерений первоначально методом ECV было проведено исследование образца № 1 с простой конфигурацией слоев. Полученный профиль распределения ОНЗ по глубине образца представлен на рис. 1. Как видно из рис. 1, верхний сильнолегированный эпитаксиальный слой имеет толщину 200 нм и легирование  $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>, что полностью совпадает с паспортными данными образца. Далее уровень легирования монотонно убывает согласно дебаевскому размытию [8] при переходе к полуизолирующей подложке с концентрацией по данным ECV на уровне  $\sim 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Отметим, что суммарная глубина протравы образца после ECV измерений составила 320 нм. АСМ скан кратера травления представлен на рис. 2. Как видно, глубина кратера травления по данным АСМ составляет около 330 нм, что близко к данным ECV.

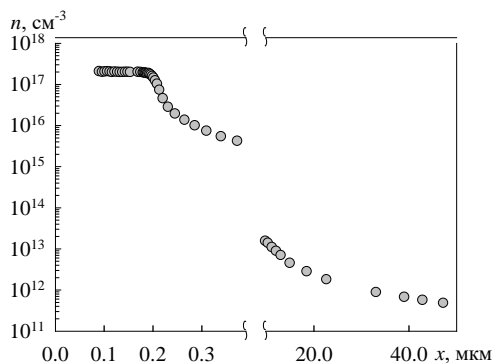


Рис. 1. Профиль распределения концентрации ОНЗ в образце 1

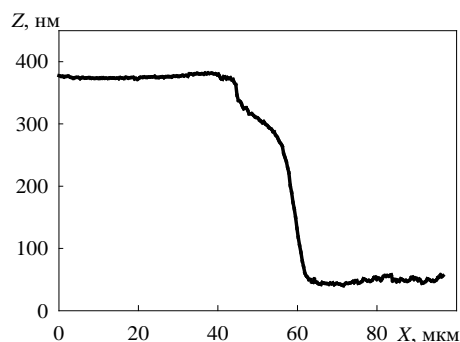


Рис. 2. АСМ скан кратера травления образца 1

На рис. 3 приведено сравнение профиля концентрации свободных носителей заряда, измеренного в режиме профилирования с травлением (1) при фиксированном напряжении

смещения  $-0.6$  В (образец № 2) с профилем концентрации (2), полученным в режиме профилирования границей области объемного заряда образца № 3 (последний профиль пересчитывается из вольт-фарадной характеристики). Как видно из сопоставления полученных профилей, для того чтобы минимизировать ошибки, связанные с влиянием последовательного сопротивления слаболегированных слоев, целесообразно измерять вольт-фарадные характеристики на каждом шаге травления. Такой подход позволяет уверенно различать близкорасположенные пики концентрации, связанные с эмиттерной областью и квантовой ямой. Расчет заряда по результатам ECV измерений позволил заключить, что плотность двумерного электронного газа в КЯ образца №3 равна  $4.1 \cdot 10^{12}$   $\text{см}^{-2}$ .

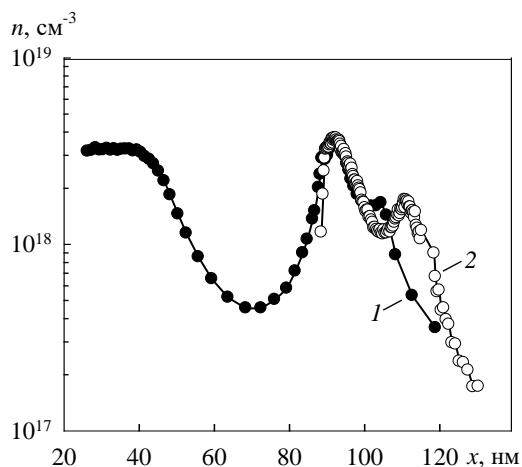


Рис. 3. Профили распределения концентрации ОНЗ в образцах 2 и 3

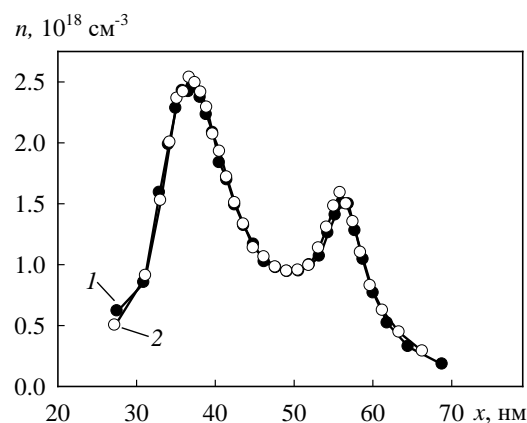


Рис. 4. Профили распределения концентрации ОНЗ в образцах 4 и 5

На рис. 4 изображены рассчитанные из ВФХ профили концентрации свободных носителей заряда односторонне легированных образцов (№ 4, кривая 1 и № 5, кривая 2), выращенных при одинаковых условиях. Как видно, концентрационные профили практически идентичны, что подтверждает уверенную воспроизводимость параметров структур в анализируемом ростовом процессе. Пик концентрации, соответствующий эмиттерному слою, имеет значение  $2.5 \cdot 10^{18}$   $\text{см}^{-3}$ , для КЯ он составляет  $1.5 \cdot 10^{18}$   $\text{см}^{-3}$  (соответственно, плотность 2DEG электронов равна  $2.2 \cdot 10^{12}$   $\text{см}^{-2}$ ).

### Заключение

Методом ECV измерен набор рНЕМТ структур, содержащих квантовые ямы InGaAs/GaAs/AlGaAs. Получены профили распределения свободных носителей заряда, проведена оценка положения сильнолегированного эмиттерного слоя и концентрации электронов в квантовой яме. При исследовании методом ECV сложных многослойных структур с резким градиентом легирования измерение и анализ вольт-фарадных характеристик на каждом шаге травления позволяет получать более корректный профиль концентрации носителей заряда по сравнению с обычно используемым режимом профилирования путем травления при фиксированном напряжении.

Работа выполнена в Ресурсном центре физики твердого тела СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Образцы выращены в ЗАО «Светлана-Рост».

### Библиографический список

1. Ross R.L., S.P. Svensson, P. Lugli. Pseudomorphic HEMT Technology and Applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

2. G. Yakovlev, D. Frolov, V. Zubkov. Investigation of delta-doped pHEMT InGaAs/GaAs/AlGaAs structures by the electrochemical capacitance-voltage technique // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 690 (1) 012015
3. Zhou G.L., W. Liu, M.E. Lin. Charge density control of single and double  $\delta$ -doped PHEMT grown by molecular beam epitaxy // *Journal of Crystal Growth*. 2001. Vols. 227–228. P. 218-222.
4. V. Zubkov, O. Kucherova, D. Frolov, A. Zubkova. Electrochemical profiling of heterostructures with multiple quantum wells InGaN/GaN // *Phys. Stat. Sol. C*. 2013. V.10, N 3. P. 342–345.
5. C.E. Stutz, B. Jogai, D.C. Look, J.M. Ballingall, T.J. Rogers. Electrochemical capacitance-voltage analysis of delta-doped pseudomorphic high electron mobility transistor material // *Applied Physics Letters*. 1994. Vol. 64. № 20. P. 2703-05.
6. Jogai B., C.E. Stutz. Effect of parasitics on electrochemical capacitance-voltage profiling of pseudomorphic high electron mobility transistor structures // *Journal of Electronic Materials*. 1997. Vol. 26. № 7. P. 863-867.
7. Д.С. Фролов, Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков, А.Л. Дудин, А.В. Соломникова, Е.С. Кунашик. Диагностика морфологии и электронного спектра рHEMT гетероструктур // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2016. № 2. С. 6-11.
8. Г.Е. Яковлев, Д.С. Фролов, А.В. Зубкова, Е.Е. Левина, В.И. Зубков, А.В. Соломонов, О.К. Стерлядкин, С.А. Сорокин. Исследование ионно-имплантированных фоточувствительных кремниевых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования // *ФТП*. 2016. Т. 50, № 3, С. 324-330.