



УДК 621.315.592

Д. С. Фролов, Г. Е. Яковлев, В. И. Зубков,
А. Л. Дудин, А. В. Соломникова, Е. С. Кунашик
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Диагностика морфологии и электронного спектра pHEMT-гетероструктур

Методами электрохимического вольт-фарадного профилирования и атомно-силовой микроскопии исследовались полупроводниковые pHEMT-гетероструктуры на базе InGaAs/GaAs/AlGaAs. Определены профили концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктуры, плотность двумерного электронного газа в квантовой яме, а также качество поверхности выращенных эпитаксиальных слоев.

Электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, атомно-силовая микроскопия, pHEMT, GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs

Развитие современной полупроводниковой индустрии требует тщательного контроля параметров гетероструктур на различных стадиях технологического процесса. Сложные современные приборы электроники включают в себя до нескольких десятков различных слоев с переменным составом толщиной вплоть до нескольких нанометров. Вследствие различия состава такие слои могут иметь различные периоды кристаллических решеток, что приводит к возникновению внутренних механических напряжений, изменяющих ширину запрещенной зоны и разрывы энергетических зон. Характеризация таких приборов требует использования уникального диагностического оборудования.

В 2010 г. в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» на факультете электроники создан Ресурсный центр «Физика твердого тела и материаловедение для радиоэлектронных и телекоммуникационных систем». Ресурсный центр оснащен последним поколением измерительных приборов всемирно известных производителей, таких как сканирующий зондовый микроскоп Solver NEXT (NT-MDT), электрохимический профилометр ECVPro (Nanometrics) с возможностью измерения нитридных материалов, измерительное оборудование компании «Agilent», средства автоматизации и плат-

форма PXI компании «National Instruments». Коллективом сотрудников центра создан уникальный аппаратно-программный комплекс спектроскопии адмиттанса в широком температурном диапазоне на базе криогенной зондовой станции Janis CCR-10-2, LCR-метра Agilent E4980A и температурного контроллера LakeShore 336 [1]. Реализуемая комплексная диагностика структур включает: вольт-фарадное (CV) профилирование для структур с барьером Шотки в широком диапазоне температур; электрохимическое вольт-фарадное профилирование (ECV) структур без электрических контактов; спектроскопию адмиттанса (комплексной проводимости), включающую температурные и частотные спектры проводимости/емкости при различных приложенных смещениях и частотах тестового сигнала, атомно-силовую микроскопию (АСМ). Имеется возможность дифференциальной диагностики основных электрофизических (оптических) параметров чипов по пластине с высоким разрешением по координате. Применяемые методы комплексной диагностики позволяют получать всестороннюю информацию о характеристиках структур: морфологию поверхности, распределение концентрации носителей заряда, ширину области объемного заряда, параметры локальных энергетических уровней и уровней квантования (энергия активации, сечение захвата) и т. д.

Имеющееся в распоряжении Ресурсного центра оборудование позволяет исследовать широкий спектр электрофизических параметров полупроводниковых материалов и структур (от узкозонного InAs до широкозонного CVD алмаза) [2], [3], в т. ч. и актуальных в настоящее время для СВЧ-электроники InGaAs/GaAs/AlGaAs псевдоморфных полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (pHEMT). Результаты проведенных в Ресурсном центре исследований светодиодных структур на аппаратно-программном комплексе спектроскопии адмиттанса опубликованы в [4].

В данной статье подробно остановимся на других измерительных методах – электрохимическом вольт-фарадном профилировании и атомно-силовой микроскопии применительно к полупроводниковым pHEMT-структурам.

При разработке эпитаксиальных структур для изготовления таких транзисторов важно соблюдать баланс между концентрацией примеси в сильнолегированном слое, определяющем 2D-концентрацию в канале, и толщиной нелегированного слоя, определяющего подвижность носителей заряда и быстродействие прибора [5]. Поэтому при оптимизации pHEMT-структур важно контролировать распределение как примеси, так и свободных носителей заряда [6].

Метод электрохимического вольт-фарадного профилирования позволяет получить информацию как о распределении примеси, так и о концентрации свободных носителей заряда [7]. Метод ECV входит в стандарты Международной ассоциации поставщиков полупроводниковой промышленности SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) [8] и успешно применяется за рубежом для исследования pHEMT-структур [9]. Измерение однородно-легированных полупроводниковых структур ECV-методом представляет собой достаточно рутинную задачу. В то же время при ECV-измерениях современных многослойных pHEMT-структур оказывается необходим тщательный подбор параметров травления, а также учет влияния последовательного со-

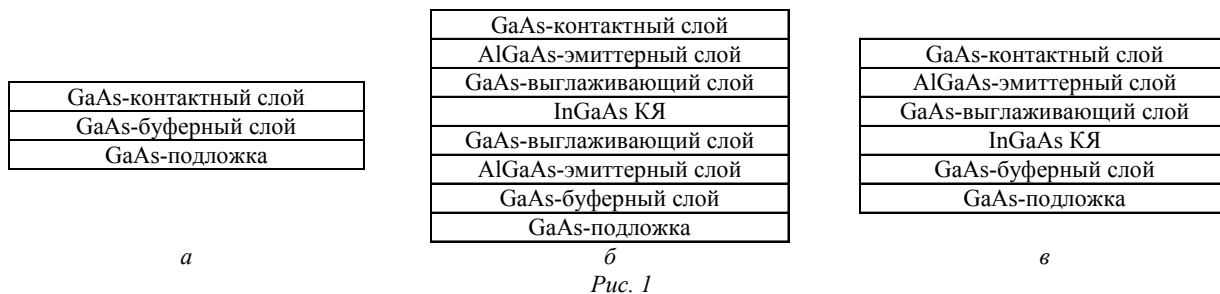
противления слаболегированных слоев на измерения емкости [10].

Далее приводятся результаты измерения концентрации основных носителей заряда по глубине структур и контроля морфологии поверхности для набора pHEMT-образцов.

Исследуемые образцы pHEMT-структур. Авторами исследовался набор из пяти pHEMT-гетероструктур на базе InGaAs/GaAs/AlGaAs, выращенных на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Послойная структура исследованных образцов представлена на рис. 1.

На рис. 1, *а* (образец № 1) представлена полуизолирующая подложка GaAs с выращенным на поверхности эпитаксиальным слоем GaAs *n*-типа толщиной 210 нм и уровнем легирования $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На рис. 1, *б, в* (образцы № 2–5) представлены стандартные InGaAs/GaAs/AlGaAs pHEMT-структуры, некоторые из них (образцы № 3–5) не имели верхних сильнолегированных слоев. Образцы № 2 и 3 (рис. 1, *б*) имели двухстороннее легирование в окрестностях квантовой ямы (КЯ), в то время как образцы № 4 и 5 (рис. 1, *в*) имели только один эмиттерный слой с меньшим уровнем легирования, в остальном структуры были идентичны. КЯ $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ располагалась на глубине 54.5 нм и имела ширину 12 нм.

Методика ECV-измерений. Стандартный метод вольт-фарадного профилирования широко используется для характеристики полупроводниковых материалов и структур. В CV-методе для построения профиля концентрации необходимо измерять емкость в диапазоне напряжений смещения. В электрохимическом вольт-фарадном профилировании концентрационный профиль регистрируется за счет смещения границы интерфейса электролит–полупроводник в процессе травления, при этом напряжение смещения остается постоянным. В ECV, как и в CV-методе, концентрация свободных носителей заряда рассчитывается из производной измеренной емкости (*C*) по напряжению (*V*):



$$n(x_d) = -\frac{C^3}{q\epsilon\epsilon_0 A^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1},$$

где q – элементарный заряд; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; A – площадь контакта «электролит–образец». Геометрическое положение границы области объемного заряда, на которой измеряется концентрация, определяется как

$$x_d = \epsilon\epsilon_0 A^2 / C.$$

В случае электрохимического вольт-фарадного профилирования dC/dV обычно измеряется модуляционным методом, в котором тестовый сигнал небольшой амплитуды накладывается на низкочастотный сигнал, задающий напряжение смещения образца (в большинстве случаев это напряжение остается фиксированным на протяжении всего измерения). В обычных CV-измерениях эта производная рассчитывается путем численного дифференцирования измеренной вольт-фарадной характеристики (ВФХ).

Глубина травления в ECV-методе определяется по количеству удаленного вещества, полученного из электрохимического закона Фарадея:

$$x_r = \frac{M}{zF\rho A} \int_0^{t_0} i(t) dt,$$

где M – молярная масса; z – валентное число ионов вещества (число электронов, необходимое для растворения одной молекулы); F – постоянная Фарадея; ρ – удельная плотность материала; t – время. Необходимо заметить, что в случае сложных гетероструктур, в которых слои состоят из различных полупроводников, изменением параметров материала при обработке данных измерений обычно пренебрегают.

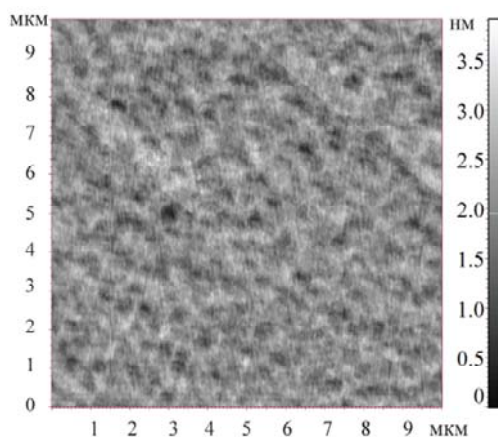


Рис. 2

Измерения концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) по глубине структуры проводились при комнатной температуре с использованием профилометра ECVPro. Раствор 0.2М NaOH с добавлением EDTA использовался для образования электролитического выпрямляющего контакта площадью 0.1 см². При ECV-профилировании шаг травления составлял 1 нм. Частота и амплитуда переменного тестового сигнала составляли 300 Гц и 10 мВ соответственно. В ряде экспериментов для измерения ВФХ использовался LCR-измеритель Agilent E4980A, который подключался к электрохимической ячейке установки ECVPro через блок реле.

Послойная структура рНЕМТ транзисторов состоит из множества слоев различных материалов, электрохимическое травление которых происходит с разной скоростью. Поэтому в процессе выбора оптимальных параметров ECV-травления важно проверять количество стравленного материала на разных этапах измерения. Для контроля глубины и качества травления в работе использовалась АСМ.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Одним из ключевых параметров гетероструктуры, определяющих качество приборов, является совершенство поверхности и гетерограниц выращенных слоев. Измерения морфологии поверхности образцов проводились на АСМ Solver NEXT в полуконтактном режиме. Средняя скорость сканирования составляла 0.6 Гц, а количество точек в одной строке сканирования выбиралось, исходя из свойств поверхности, и составляло 300 или больше.

Измеренная морфология поверхности образца № 3 на площади 10 × 10 мкм и профиль поверхности вдоль выбранной линии, параллельной оси X, представлены на рис. 2 и 3. Как видно, поверх-

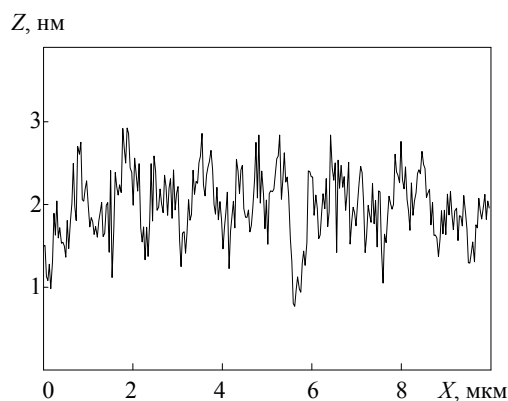


Рис. 3

ность однородна, а среднее значение ее шероховатости (Z) составляет всего 2 нм, что позволяет говорить об очень высоком качестве подготовки поверхности.

При изучении большего поля поверхности этого же образца становятся заметны другие особенности. На рис. 4 представлена морфология образца № 3 на скане размером 32×32 мкм. В таком масштабе становятся заметны полосы нанометровой высоты с периодом около 5 мкм, оставленные в результате полировки образца.

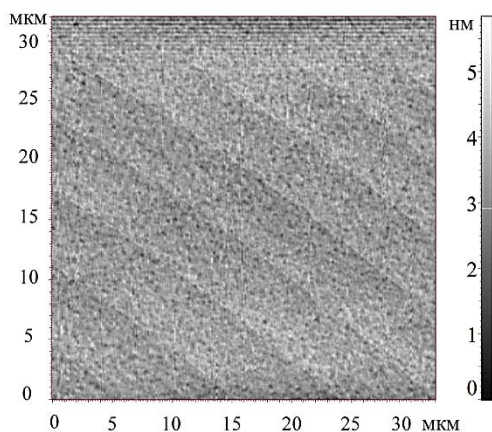


Рис. 4

Стоит отметить, что данные измерения проводились в режиме «low voltage» (низкого напряжения), что позволяет, в отличие от режима «high voltage», получать АСМ-изображения с высоким разрешением, вплоть до атомарного.

Для подбора оптимального электролита и обработки режимов измерений первоначально методом ECV было проведено исследование образца № 1 с простой конфигурацией слоев. Полученный профиль распределения ОНЗ по глубине образца представлен на рис. 5. Как видно из рис. 5, верхний сильнолегированный эпитаксиальный слой имеет толщину 200 нм и легирование $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что полностью совпадает с пас-

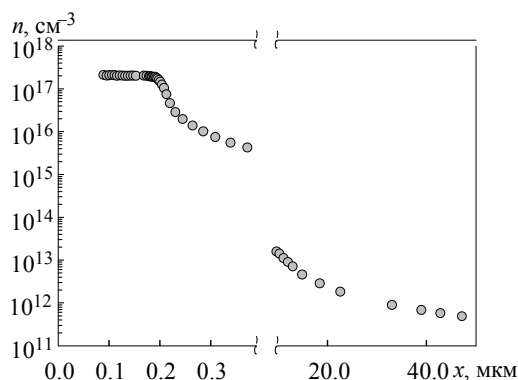


Рис. 5

портными данными образца. Далее уровень легирования монотонно убывает согласно дебаевскому размытию (этот эффект подробно изучался нами на кремниевых образцах [11] при переходе к полупроводящей подложке с концентрацией по данным ECV на уровне $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$). Отметим, что эти измерения являются рекордным достижением по измерению минимальной концентрации ОНЗ в полупроводнике. Суммарная глубина протравы образца после ECV-измерений составила 320 нм. Для верификации глубины и качества травления использовался АСМ. Скан представлен на рис. 6. Как видно, глубина кратера травления по данным АСМ составляет около 330 нм, что близко к данным ECV.

Выбор напряжения смещения, при котором проводятся ECV-измерения рНЕМТ-структур, является нетривиальной и важной задачей, обеспечивающей корректность результатов. Из-за высокой концентрации примеси в верхних слоях и малого напряжения пробоя сильнолегированного GaAs выбор доступных напряжений смещения ограничен. На рис. 7 приведено сравнение профиля концентрации свободных носителей заряда, измеренного в режиме «etching mode» (1) при фиксированном напряжении смещения -0.6 В (образец № 2), с профилем концентрации, полученным в режиме «depletion mode» (2) из вольт-фарадной характеристики образца № 3 со стравленным верхним слоем. На обеих кривых наблюдаются два пика концентрации. Первый пик, соответствующий сильнолегированной (эмиттерной) области в рНЕМТ-структуре, совпадает при измерении обоими методами. Различие в положении второго пика, соответствующего квантовой яме, можно объяснить систематической ошибкой в определении координаты из-за влияния последовательного сопротивления. Амплитуда второго пика отличается из-за того, что в режиме «etching

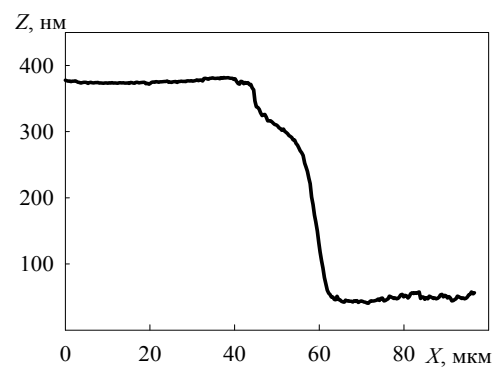


Рис. 6

mode» измерения производятся при одном и том же смещении, а получаемый в режиме «depletion mode» профиль концентрации соответствует различным напряжениям смещения.

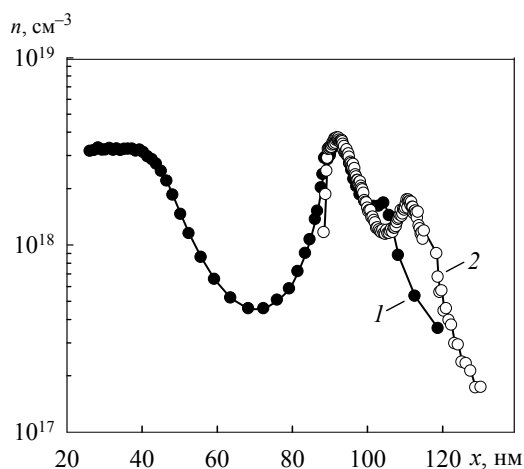


Рис. 7

Так как ECV-измерения в режиме «etching mode» проводятся при фиксированном напряжении смещения, измеренный профиль может сильно зависеть от выбранной рабочей точки из-за влияния последовательного сопротивления на измеряемую емкость. Для того чтобы минимизировать ошибки, связанные с влиянием последовательного сопротивления слаболегированных слоев, необходимо измерять ВФХ на каждом шаге травления. Такой подход позволяет уверенно различать близкорасположенные пики, связанные с эмиттерной областью и квантовой ямой. По результатам измерений данных образцов можно заключить, что плотность двумерного электронного газа в КЯ равна $4.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 8 изображены экспериментальные ВФХ односторонне легированных образцов (№ 4 (1) и № 5 (2)), выращенных при одинаковых условиях. Рассчитанные из них профили концентрации свободных носителей заряда представлены на рис. 9.

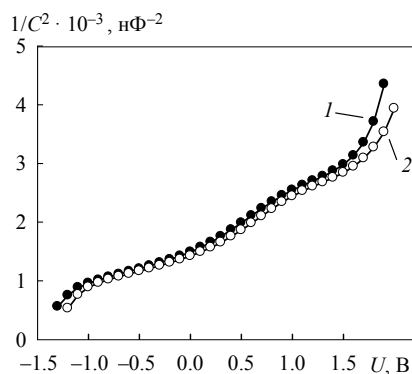


Рис. 8

Представленные на рис. 9 концентрационные профили практически идентичны, что подтверждает уверенную воспроизводимость 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 равна $2.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$). Результаты проведенных измерений показывают, что в случае двустороннего легирования (образец № 2), при предварительном утонении верхнего слоя, плотность 2DEG в квантовой яме почти вдвое выше, чем для схожих односторонне легированных образцов № 4 и 5.

Комплексное использование взаимодополняющих методов диагностики сложных полупроводниковых наногетероструктур позволяет досконально проанализировать их морфологию поверхности, послойное строение, концентрационный профиль основных носителей заряда, энергетическую структуру активной области и т.д. Применение уникального для России оборудования позволяет дать полную информацию об электрофизических параметрах структур, что обеспечивает эффективную обратную связь с технологическим процессом. Применительно к последнему особенно эффективен метод ECV, так как он позволяет без трудоемкой подготовки образца к измерениям получать воспроизводимое с точностью вплоть до 1 нм реальное распределение ОНЗ по глубине гетероструктур в широком диапазоне концентраций (от 10^{12} до 10^{21} см^{-3}).

В работе методами ECV и АСМ измерено несколько InGaAs/GaAs/AlGaAs pHEMT-структур. Получены профили распределения свободных носителей заряда, оценены положение сильнолегированного эмиттерного слоя и концентрация ОНЗ в КЯ. Измерение и анализ ВФХ на каждом

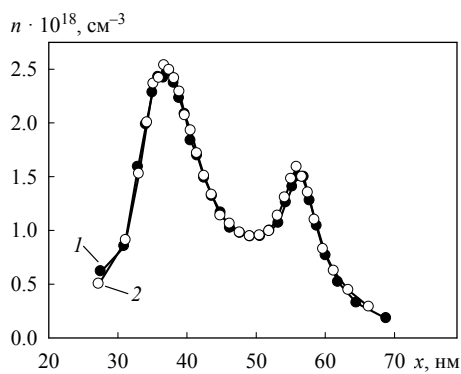


Рис. 9

шаге травления позволяют получить более корректный профиль концентрации в рНЕМТ-структурах. Измерения морфологии поверхности эпитаксиальных слоев демонстрируют высокое совершенство технологии.

Работа выполнена в Ресурсном центре физики твердого тела СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Образцы были

выращены в ЗАО «Светлана-Рост». Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки по Соглашению № 14.582.21.0010 от 14.10.2015 г. в рамках ФЦПР 2014-2020, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58215X0013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ электростатического взаимодействия зарядов в множественных квантовых ямах InGaAs/GaAs методами спектроскопии адмиттанса / В. И. Зубков, И. Н. Яковлев, В. Г. Литвинов, А. В. Ермачихин, О. В. Кучерова, В. Н. Черкасова // ФТП. 2014. Т. 48, вып. 7. С. 944–950.
2. Frolov D., Yakovlev G., Zubkov V. The measurements of doping density in InAs by capacitance-voltage techniques with electrolyte barriers // J. of Physics: Conf. Series. 2015. Vol. 643. P. 012086.
3. Temperature admittance spectroscopy of boron doped CVD diamond / V. I. Zubkov, O. V. Kucheroва, S. A. Bogdanov, A. V. Zubkova, J. E. Butler, V. A. Ilyin, A. V. Afanas'ev, A. L. Vikharev // JAP. 2015. Vol. 118. P. 145703.
4. Электрофизические и оптические исследования полупроводниковых гетероструктур и пластин на базе криогенной зондовой станции в диапазоне температур от 15 до 475 К / В. И. Зубков, О. В. Кучерова, И. Н. Яковлев, В. Н. Черкасова, В. А. Ильин, А. В. Соломонов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 8–13.
5. Si-delta doping and spacer thickness effects on the electronic properties in Si-delta-doped AlGaAs/GaAs HEMT structures / M. Daoudi, I. Dhifallah, A. Ouerghi, R. Chtourou // Superlattices and Microstructures. 2012. Vol. 51, № 4. P. 497–505.
6. Zhou G. L., Liu W., Lin M. E. Charge density control of single and double δ -doped PHEMT grown by molecular beam epitaxy // J. of Crystal Growth. 2001. Vol. 227–228. P. 218–222.
7. Electrochemical profiling of heterostructures with multiple quantum wells InGaN/GaN / V. Zubkov, O. Kucheroва, D. Frolov, A. Zubkova // Phys. Stat. Sol. C. 2013. Vol. 10, № 3. P. 342–345.
8. SEMI M46-1101E: Test Method for Measuring Carrier Concentrations in Epitaxial Layer Structures by ECV Profiling. 2009. URL: <http://ams.semi.org/ebusiness/standards/SEMIStandardDetail.aspx?ProductID=211&DownloadID=1322>.
9. Electrochemical capacitance-voltage analysis of delta-doped pseudomorphic high electron mobility transistor material / C. E. Stutz, B. Jogai, D. C. Look, J. M. Ballingall, T. J. Rogers // Applied Physics Letters. 1994. Vol. 64, № 20. P. 2703–05.
10. Jogai B., Stutz C. E. Effect of parasitics on electrochemical capacitance-voltage profiling of pseudomorphic high electron mobility transistor structures // J. of Electronic Materials. 1997. Vol. 26, № 7. P. 863–867.
11. Исследование ионно-имплантированных фоточувствительных кремниевых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования / Г. Е. Яковлев, Д. С. Фролов, А. В. Зубкова, Е. Е. Левина, В. И. Зубков, А. В. Соломонов, О. К. Стерлядкин, С. А. Сорокин // ФТП. 2016. Т. 50, № 3. С. 324–330.

D. S. Frolov, G. E. Yakovlev, V. I. Zubkov, A. L. Dudin, A. V. Solomnikova, E. S. Kunashik
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

DIAGNOSTIC OF MORPHOLOGY AND ELECTRONIC SPECTRUM OF PHEMT HETEROSTRUCTURES

By means of electrochemical capacitance-voltage profiling and atomic force microscopy pHEMT heterostructures on base of InGaAs/GaAs/AlGaAs were investigated. Concentration profiles over the depth of the structure were obtained as well as 2DEG density in quantum well and surface quality of the grown epitaxial layers.

Electrochemical capacitance-voltage profiling, ECV, atomic-force microscopy, pHEMT, GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs