

DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-44-50

УДК 621.315.592

**Я. В. Иванова, Г. Е. Яковлев, В. И. Зубков**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)  
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

## ЭМИССИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВАНТОВОЙ ЯМЫ С ДОНОРНЫМ ДЕЛЬТА-СЛОЕМ В pHEMT-ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

**Аннотация.** В настоящей статье проведено экспериментальное и теоретическое исследование pHEMT-гетероструктур (ГС) с квантовой ямой (КЯ) AlGaAs/InGaAs/GaAs и дельта-легированным слоем, используемых как активные области при изготовлении СВЧ-транзисторов, работающих в частотном диапазоне 4...18 ГГц. В качестве экспериментальных методик применялись: электрохимическое вольт-фарадное профилирование, методы адмиттансной спектроскопии (полной проводимости). Была проведена модернизация установки ECV-Pro, что позволило впервые в эксперименте наблюдать два концентрационных пика: от приповерхностного дельта-слоя pHEMT-транзистора и пик обогащения от КЯ. Для определения оптимальной скорости травления осуществлялся контроль дна кратера в процессе травления посредством АСМ-микроскопа. Емкость контакта "электролит-полупроводник" измерялась RLC-измерителем Agilent. Основной теоретический метод исследования в работе – численное моделирование ключевых электрофизических параметров наногетероструктуры путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона. Были определены профили дна зоны проводимости и рассчитаны уровни размерного квантования для исследуемых образцов гетероструктуры. Проведен комплексный анализ серии образцов с целью исследования влияния положения дельта-слоя на глубину залегания уровней и концентрацию носителей в КЯ. Определено оптимальное расстояние между КЯ и дельта-слоем, обеспечивающее наиболее эффективный процесс поставки носителей заряда в квантовую яму. Проведенный цикл исследований направлен на совершенствование приборов СВЧ-электроники. Он позволяет увеличить коэффициент усиления и крутизну передаточной характеристики транзисторов.

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

**Для цитирования:** Иванова Я. В., Яковлев Г. Е., Зубков В. И. Эмиссионные процессы взаимодействия квантовой ямы с донорным дельта-слоем в pHEMT-гетероструктурах // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 44–50. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-44-50

**Yana V. Ivanova, George E. Yakovlev, Vasily I. Zubkov**  
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

## EMISSION PROCESSES OF QUANTUM WELL INTERACTION WITH DELTA-LAYER IN pHEMT-HETEROSTRUCTURES

**Abstract.** The paper provides experimental and theoretical study of pHEMT heterostructures with quantum well (QW) AlGaAs/InGaAs/GaAs and delta-doped layer used as active layers for fabrication of 4-18 GHz transistors. As the experimental techniques, the electrochemical capacitance-voltage (ECV) profiling and other methods of admittance spectroscopy are applied. Modernization of commercial ECV-profiling setup allows observing for the first time the concentration peak from a near-surface delta-layer of pHEMT heterostructures together with the enrichment peak from the quantum well. In order to optimize the etching speed the crater bottom control is performed by means of AFM. The

*electrolyte-semiconductor contact capacitance is measured with Agilent RLC-meter. The main theoretical technique used in the research is numerical modeling of nanoheterostructure key electronic features by self-consistent solution of Schrödinger and Poisson equations. The potential line-up for the conduction band bottom is obtained, and the quantized energy levels are calculated. The complex analysis of series of samples is carried out in order to understand the influence of delta-layer position on the level depth and at the carrier concentration. The optimum distance between QW and delta-layer providing the most efficient charge carrier delivery to quantum well is found. The performed research is aimed at improvement of microwave electronic devices allowing increase of the gain coefficient and the transfer characteristic of SHF-transistors.*

**Key words:** electrochemical capacitance-voltage (ECV) profiling, pHEMT, quantum well, GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs, tunneling, self-consistent solution of poisson and schrodinger equations

**For citation:** Ivanova Ya. V., Yakovlev G. E., Zubkov V. I. Emission Processes of Quantum Well Interaction with Delta-Layer in PHEMT Heterostructures. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 44–50. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-44-50 (In Russian)

**Введение.** Полевые транзисторы с двумерным электронным газом (ДЭГ) высокой плотности (High Electron Mobility Transistor – HEMT) относятся к быстродействующим активным элементам микроэлектроники [1]. Регулярно появляются сведения о достижении новых рекордов, связанных с совершенствованием технологии и использованием новых материалов. В настоящей статье представлены результаты исследования структур отечественных арсенид-галлиевых псевдоморфных HEMT-транзисторов (pHEMT), предназначенных для работы на частотах 4...18 ГГц (усилители, смесители, умножители частоты, управляющие устройства и т. д.) [2], [3].

Полупроводниковые гетероструктуры (ГС) для современных pHEMT-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 [4]. Все это требует тщательного контроля параметров на различных стадиях технологического процесса. Особенно важно контролировать распределение примеси и основных носителей заряда [5]. Приводятся данные измерений методом ECV-профиллирования (Electrochemical Capacitance-Voltage) [6], [7] концентрационных пиков основных носителей заряда по глубине набора pHEMT-структур, выращенных на подложках GaAs.

При использовании дельта-легированного слоя важное значение имеет эмиссионное взаимодействие между ним и квантовой ямой (КЯ). Существует два основных механизма эмиссии – термополевая и туннельная. Разделение влияния каждого из них представляет многофакторную

задачу и будет рассмотрено в следующих статьях. В частности, расчет туннельной составляющей численно может быть проведен в соответствии с методикой [8]. Для определения влияния дельта-слоя на основные параметры КЯ в настоящей статье было проведено численное моделирование таких параметров, как профиль дна зон, разрыв зон, положение уровней размерного квантования, концентрационные профили, подвижность носителей и др. Расчет осуществлялся в квантовом ящике путем самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона в соответствии с [9].

**Эксперимент и моделирование.** Исследовался набор идентичных pHEMT-гетероструктур, содержащих квантовую яму AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращенных на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии в АО "Светлана-Рост" (Санкт-Петербург). Образцы представляли собой односторонние дельта-легированные GaAs pHEMT ГС для маломощных усилителей. Концентрация примеси в донорном слое образцов в процессе роста задавалась на уровне  $2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Использование дельта-легирования в качестве донорного слоя позволяет по сравнению с объемным легированием при сохранении рабочих характеристик прибора получить большее значение крутизны и повысить управляемость транзистора [10]. Это также способствует уменьшению напряжения отсечки. Квантовая яма  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$  располагалась на глубине 54.5 нм и имела ширину 14 нм.

Измерения концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) по глубине структуры проводились при температуре 296 К с использованием профилометра ECV-Pro (Nanometrics). Профиль распределения концентрации основных носителей заряда в исследуемом GaAs pHEMT-образце с дельта-

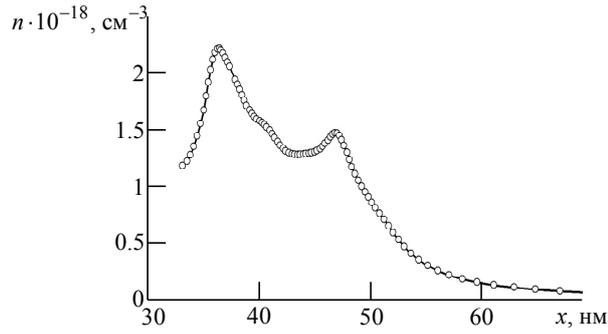


Рис. 1

легирующим слоем и зависимость высоты барьера Шотки на границе раздела "полупроводник GaAs / электролит Тайрон" представлены на рис. 1. Раствор 0.2 М Тайрона использовался для образования электролитического выпрямляющего контакта площадью  $0.1 \text{ см}^2$ . 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  $0.5 \text{ мА}/\text{см}^2$ . В ряде экспериментов для измерения вольт-фарадных характеристик использовался LCR-измеритель AgilentE4980A, который подключался к электрохимической ячейке установки ECV-Pro через специально изготовленный блок реле.

Электрохимическое травление каждого слоя рНЕМТ-транзистора 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 обеспечило в настоящей статье выбор оптимальных параметров измерений.

Моделирование проводилось с использованием самосогласованного решения системы уравнений Шредингера и Пуассона в квантовом ящике. Причем изначально данные были получены для структуры с одиночной КЯ, а затем для системы КЯ + дельта-слой. Основные теоретические выводы получены сравнением полученных результатов.

На сегодняшний день классическим методом вольт-фарадного профилирования в экспериментах наблюдался только один пик на концентрационном профиле рНЕМТ-структур, приписываемый области КЯ (ДЭГ канала) [11]. Мы же наблюдаем два пика: отклик от дельта-слоя и КЯ (рис. 1). Наличие двух пиков в измерениях объясняется тем, что используемый жидкий электролит создает на поверхности меньший выпрямляющий

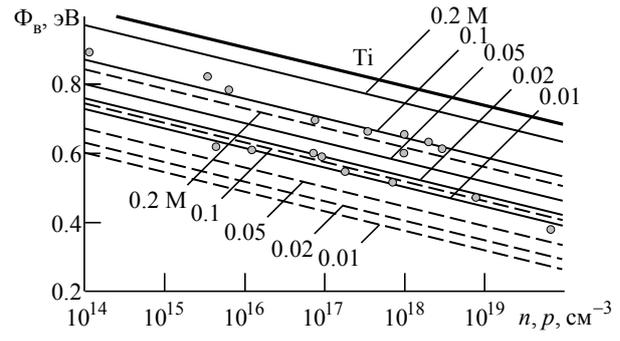


Рис. 2

барьер по сравнению с металлическим контактом при классическом вольт-фарадном профилировании, поэтому исходная (при  $U = 0$ ) ширина обедненной области оказывается меньше [12]. Для подтверждения этого была проведена оценка высоты барьера [13]. Анализ вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик структур на основе арсенида галлия различного уровня легирования в контакте с электролитом Тайрон различной концентрации позволил построить соответствующие номограммы высоты барьера Шотки ( $\Phi_B$ ) на границе раздела "полупроводник/электролит" (рис. 2). Черной толстой сплошной линией обозначена кривая для типичного затворного электрода GaAs рНЕМТ – титана (Ti), точки – экспериментальные данные, остальные линии – результаты моделирования. Черные сплошные линии – материал *n*-типа, штриховые – *p*-типа. Заметно, что при концентрации  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  выигрывает в меньшей высоте барьера (разница  $\sim 0.25 \text{ эВ}$ ) при использовании электролита выражается в уменьшении исходной ширины области объемного заряда (ООЗ) под барьером на  $\sim 20 \text{ нм}$ , что как раз соответствует области расположения донорного дельта-слоя.

Наблюдаемый профиль распределения концентрации ОНЗ исследуемого образца хорошо коррелирует с паспортными данными. На рис. 3 представлен профиль распределения концентрации, построенный в более широком диапазоне по коор-

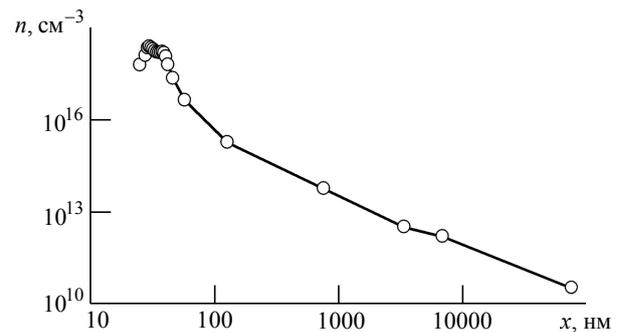


Рис. 3

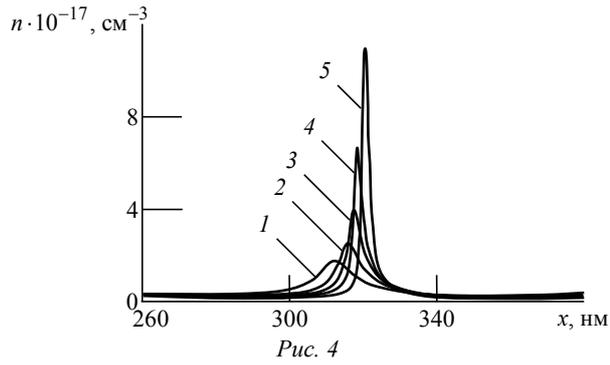


Рис. 4

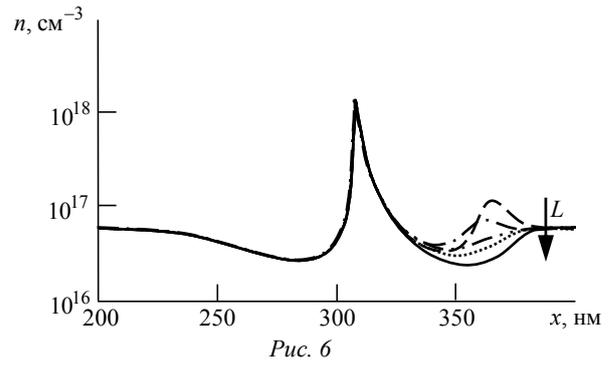


Рис. 6

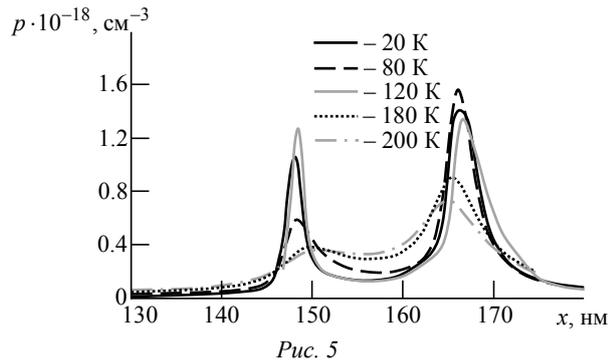


Рис. 5

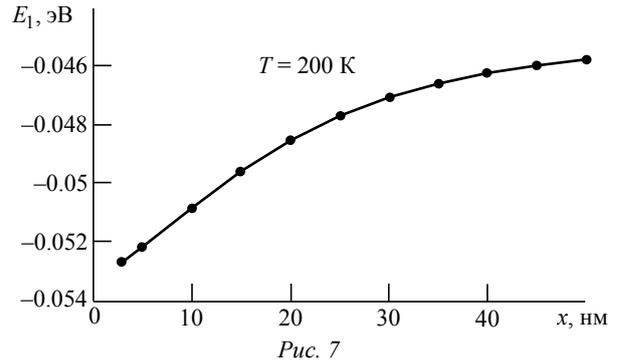


Рис. 7

динате (до 100 мкм). Видно, что после отклика от КЯ наблюдаемое значение концентрации монотонно убывает согласно дебаевскому размытию [14] при переходе к полуизолирующей подложке с концентрацией по данным метода ECV на уровне  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Отметим, что эти измерения являются рекордным достижением по измерению минимальной концентрации ОНЗ в полупроводнике. Помимо уменьшения разрешения ввиду резкого уменьшения емкости, которая становится сравнима с уровнем шума, сложность измерения слаболегированных слоев обусловлена и тем, что в этом случае толщина ООЗ становится сравнима с толщиной образца [15].

**Теоретические результаты.** Моделирование проводилось в области квантового ящика. Расчеты показали, что положение уровня Ферми не зависит от заряда в дельта-слое, поскольку оно определяется толстым слоем электронейтрального образца. На этом фоне вклад дельта-слоя (или КЯ и дельта-слоя) составляет менее 0.1 % по толщине структуры. Таким образом, можно утверждать, что дельта-легированный слой не оказывает существенного влияния на электрофизические характеристики структуры. Для исследования перераспределения носителей заряда между КЯ и дельта-слоем с изменением температуры проводились вольт-фарадные CV-измерения модельных структур, содержащих КЯ (*n*-типа) InGaAs шириной 10 нм и дельта-слой углерода, удаленный от КЯ на расстояние 13 нм.

Образцы получены в НИФТИ ННГУ методом МOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) при атмосферном давлении водорода – газаносителя. По экспериментальным CV-характеристикам были рассчитаны профили концентрации основных носителей заряда (электронов) при разных температурах, К: 1 – 300; 2 – 250; 3 – 200; 4 – 155; 5 – 75 (рис. 4).

Для структуры с одиночной КЯ InGaAs/GaAs увеличение температуры от 75 до 250 К (кривые 2–5 на рис. 4) приводило к значительному (порядка 5 раз) уменьшению максимального значения пика концентрации основных носителей заряда, что, как указывалось ранее, связано с увеличением вероятности термоактивационного выброса носителей заряда из КЯ при повышении температуры. Для структуры с КЯ и дельта-легированным слоем (*p*-типа) наблюдается более слабое (менее 2 раз) уменьшение амплитуды наблюдаемой концентрации основных носителей заряда (дырок) при повышении температуры (рис. 5). Это может являться следствием того, что дельта-слой углерода, расположенный рядом с КЯ, является 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 локали-

зации носителей заряда в области дельта-слоя. Понижение температуры приводит к усилению этого взаимодействия. Моделирование показало также, что при определенном расстоянии от КЯ до дельта-слоя (порядка 25 нм для КЯ шириной 10 нм и разрывом зоны проводимости 175 мэВ) на концентрационных зависимостях разрешаются отдельные пики для КЯ и дельта-слоя (рис. 6). При уменьшении расстояния  $L$  между КЯ и дельта-слоем от 40 до 5 нм наблюдается уменьшение величины пика для дельта-слоя и незначительное увеличение величины пика для КЯ, что связано с захватом носителей ямой.

Наличие дельта-легированного слоя рядом с КЯ не только влияет на заполнение ее носителями заряда, но также оказывает влияние на положение

уровней квантования. На рис. 7 представлена зависимость положения основного уровня квантования от расстояния между КЯ и дельта-легированным слоем, полученная при моделировании.

**Заключение.** Таким образом, в результате теоретического исследования установлено, что при расстоянии между КЯ и дельта-слоем порядка не более одной–двух дебаевских длин дельта-слоем является эффективным поставщиком носителей заряда в область КЯ. При этом видоизменяется потенциал в области КЯ и происходит изменение положения уровней квантования. Модернизация экспериментальной установки позволила впервые зарегистрировать два концентрационных пика методом ECV-профилирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mimura T. Development of High Electron Mobility Transistor // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 44, no. 12. P. 8263–8268. doi: 10.1143/JJAP.44.8263
2. Golio M., Golio J. RF and Microwave Passive and Active Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2007. 736 p.
3. Pejovic Momcilo M., Pejovic Milic M. Different Types of Field-Effect Transistors. Rijeka: InTech, 2017. 182 p. doi: 10.5772/65626
4. Электрохимическое вольт-емкостное профилирование концентрации свободных носителей заряда в НЕМТ-гетероструктурах на основе соединений InGaAs/AlGaAs/GaAs / П. Н. Брунков, А. А. Гуткин, М. Э. Рудинский, О. И. Ронжин, А. А. Ситникова, А. А. Шахин // *ФТП.* 2011. Т. 45, № 6. С. 829–835.
5. Гетероструктуры с квантовыми точками InGaAs/GaAs, легированными атомами переходных элементов. II: Исследование циркулярно-поляризованной люминесценции / М. В. Дорохин, С. В. Зайцев, А. В. Рыков, А. В. Здравейцев, Е. И. Малышева, Ю. А. Данилов, В. И. Зубков, Д. С. Фролов, Г. Е. Яковлев, А. В. Кудрин // *ЖТФ.* 2017. Т. 87, № 10. С. 1539–1544. doi: 10.21883/JTF.2017.10.44999.1989
6. Ambridge T., Faktor M. An Automatic Carrier Concentration Profile Plotter Using an Electrochemical Technique // *J. Appl. Electrochem.* 1975. Vol. 5, no. 4. P. 319–328. doi: 10.1007/BF00608796
7. Blood P. Capacitance-Voltage Profiling and the Characterisation of III–V Semiconductors Using Electrolyte Barriers // *Semicond. Sci. Technol.* 1986. Vol. 1. P. 7–27. doi: 10.1088/0268-1242/1/1/002
8. Иванова Я. В., Зубков В. И. Численный расчет коэффициента прозрачности легированной гетероструктуры с квантовой ямой методом внутренней задачи // *Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ"*. 2018. Вып. 5. С. 5–10.
9. Зубков В. И. Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами  $\text{In}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}/\text{GaAs}$  методом вольт-фарадных характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции // *ФТП.* 2007. Т. 41, Вып. 3. С. 331–337
10. A Delta-Doped InGaP/InGaAs pHEMT with Different Doping Profiles for Device-Linearity Improvement / Y.-C. Lin, E. Y. Chang, H. Yamaguchi, W.-Ch. Wu, Ch.-Y. Chang // *IEEE Trans. Electron Devices.* 2007. Vol. 54, no. 7. P. 1617–1625. doi: 10.1109/TED.2007.899398
11. Теоретические и экспериментальные исследования вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик НЕМТ структур и полевых транзисторов / Е. А. Тарасова, Е. С. Оболенская, А. В. Хананова, С. В. Оболенский, В. Е. Земляков, В. И. Егоркин, А. В. Неженцев, А. В. Сахаров, А. Ф. Цацульников, В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, Г. В. Медведев // *ФТП.* 2016. Т. 50, вып. 12. С. 1599–1604. doi: 10.21883/ftp.2016.12.43883.29
12. Особенности электрохимического вольт-фарадного профилирования арсенид-галлиевых светоизлучающих и pHEMT-структур с квантово-размерными областями / Г. Е. Яковлев, М. В. Дорохин, В. И. Зубков, А. Л. Дудин, А. В. Здравейцев, Е. И. Малышева, Ю. А. Данилов, Б. Н. Звонков, А. В. Кудрин // *ФТП.* 2018. Т. 52, № 8. С. 873–880. doi: 10.21883/FTP.2018.08.46212.8708
13. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. 456 с.
14. Kroemer H., Chien W. Y. On the Theory of Debye Averaging in the C-V Profiling of Semiconductors // *Solid State Electron.* 1981. Vol. 24, no. 7. P. 655–660. doi: 10.1016/0038-1101(81)90195-7
15. Kokorev M. F., Maleev N. A. A New Approach to the Determination of Gate Length and Other Parameters of GaAs MESFETs and MODFETs // *Solid-State Electron.* 1996. Vol. 39, no. 2. P. 297–302. doi: 10.1016/0038-1101(95)00121-2

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2018 г.

**Иванова Яна Владимировна** – магистр техники и технологии по направлению "Электроника и микроэлектроника" (2012), аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – физика наноразмерных полупроводников, компьютерные технологии, численное моделирование.

E-mail: ivanova@unix-server.su

**Яковлев Георгий Евгеньевич** – магистр техники и технологии по направлению "Электроника и нанoeлектроника" (2014), аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – диагностика наноразмерных полупроводников, компьютерные технологии, моделирование.

E-mail: gy@etu.ru

**Зубков Василий Иванович** – доктор физико-математических наук (2008), профессор (2018), профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), главный научный сотрудник АО «ЦНИИ "Электрон"». Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – физика твердого тела и физика полупроводников, нанoeлектроника, моделирование и диагностика квантово-размерных гетероструктур.

E-mail: VZubkovspb@mail.ru

## REFERENCES

- Mimura T. Development of High Electron Mobility Transistor. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2005, vol. 44, no. 12, pp. 8263–8268. doi: 10.1143/JJAP.44.8263
- Golio M., Golio J. Название. Boca Raton, CRC Press, 2007, 736 p.
- Pejovic Momcilo M., Pejovic Milic M. Different Types of Field-Effect Transistors. *Rijeka, InTech*, 2017, 182 p. doi: 10.5772/65626
- Brunkov P. N., Gutkin A. A., Rudinskii M. E., Ronzhin O. I., Sitnikova A. A., Shakhmin A. A. Electrochemical Volt-Capacitance Profiling of Free Charge Carriers Concentration in HEMT Heterostructures Based on InGaAs/AlGaAs/GaAs Compounds. *Semiconductors*. 2011, vol. 45, no. 6, pp. 829–835. (In Russian)
- Dorokhin M. V., Zaitsev S. V., Rykov A. V., Zdoroveishchev A. V., Malysheva E. I., Danilov Yu. A., Zubkov V. I., Frolov D. C., Yakovlev G. E., Kudrin A. V. Heterostructures with InGaAs / GaAs Quantum Dots Doped with Atoms of Transition Elements. II. The Study of Circularly Polarized Luminescence. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2017, vol. 87, no. 10, pp. 1539–1544. (In Russian) doi: 10.21883/JTF.2017.10.44999.1989
- Ambridge T., Faktor M. An Automatic Carrier Concentration Profile Plotter Using an Electrochemical Technique. *J. Appl. Electrochem.* 1975, vol. 5, no. 4, pp. 319–328. doi: 10.1007/BF00608796
- Blood P. Capacitance-Voltage Profiling and the Characterisation of III–V Semiconductors Using Electrolyte Barriers. *Semicond. Sci. Technol.* 1986, vol. 1, pp. 7–27. doi: 10.1088/0268-1242/1/1/002
- Ivanova Ya. V., Zubkov V. I. Numerical Calculation of Doped Heterostructure Transparency Coefficient with Quantum Well by Internal Problem Method. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2018, vol. 5, pp. 5–10. (In Russian)
- Zubkov V. I. Diagnostics of  $\text{In}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}/\text{GaAs}$  Quantum Well Heterostructures Using the Capacitance-Voltage Characteristic Method: Band Breaks, Quantization Levels, Wave Functions. *Semiconductors*. 2007, vol. 41, iss. 3, pp. 331–337. (In Russian)
- Lin Y.-C., Chang E. Y., Yamaguchi H., Wu W.-Ch., Chang Ch.-Y. A Delta-Doped InGaP/InGaAs pHEMT with Different Doping Profiles for Device-Linearity Improvement. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2007, vol. 54, no. 7, pp. 1617–1625. doi: 10.1109/TED.2007.899398
- Tarasova E. A., Obolenskaya E. S., Khananova A. V., Obolenskii S. V., Zemlyakov V. E., Egorin V. I., Nezhentsev A. V., Sakharov A. V., Tsatsul'nikov A. F., Lundin V. V., Zavarin E. E., Medvedev G. V. Theoretical and Experimental Studies of Current-Voltage and Capacitance-Voltage Characteristics of HEMT Structures and Field-Effect Transistors. *Semiconductors*. 2016, vol. 50, iss. 12, pp. 1599–1604. (In Russian) doi: 10.21883/ftp.2016.12.43883.29
- Yakovlev G. E., Dorokhin M. V., Zubkov V. I., Dudin A. L., Zdoroveishchev A. V., Malysheva E. I., Danilov Yu. A., Zvonkov B. N., Kudrin A. V. Features of Electrochemical Volt-Farad Profiling of Gallium Arsenide Light-Emitting and PHEMT Structures with Quantum-Size Regions. *Semiconductors*. 2018, vol. 52, no. 8, pp. 873–880. (In Russian) doi: 10.21883/FTP.2018.08.46212.8708
- Zi S. *Semiconductor Physics*. Moscow, *Mir*, 1984, 456 p. (In Russian)
- Kroemer H., Chien W. Y. On the Theory of Debye Averaging in the C-V Profiling of Semiconductors. *Solid State Electron.* 1981, vol. 24, no. 7, pp. 655–660. doi: 10.1016/0038-1101(81)90195-7
- Kokorev M. F., Maleev N. A. A New Approach to the Determination of Gate Length and Other Parameters of GaAs MESFETs and MODFETs. *Solid-State Electron.* 1996, vol. 39, no. 2, pp. 297–302. doi: 10.1016/0038-1101(95)00121-2

Received September, 19, 2018

**Yana V. Ivanova** – Master’s Degree in Techniques and Technology in Electronics and Micro-Electronics (2012), postgraduate student of the Department of micro- and nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of two scientific publication. Area of expertise: physics of semiconductor; computer modeling; numerical methods in researches.

E-mail: [ivanova@unix-server.su](mailto:ivanova@unix-server.su)

**George E. Yakovlev** – Master’s Degree of Techniques and Technology in Electronics and Nano-Electronics (2014), postgraduate student of the Department of micro- and nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 30 scientific publication. Area of expertise: physics of semiconductor; diagnostics of nanoheterostructures, computer modeling.

E-mail: [gy@etu.ru](mailto:gy@etu.ru)

**Vasily I. Zubkov** – D.Sc. in Physics and Mathematics (2008), Professor (2018) of the Department of Micro- and nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Chief Researcher of JSC "NRI "Electron". The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: physics of semiconductor; nanoelectronics; admittance spectroscopy; diagnostics of nanoheterostructures; computer modeling.

E-mail: [vzubkovspb@mail.ru](mailto:vzubkovspb@mail.ru)

---