

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-1-35-44>

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОЛЬТ-ФАРАДНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

© **Георгий Евгеньевич Яковлев***, **Дмитрий Сергеевич Фролов**,
Василий Иванович Зубков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197376, г. С.-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5; *e-mail: geyakovlev@etu.ru

*Статья поступила 9 июля 2020 г. Поступила после доработки 11 августа 2020 г.
Принята к публикации 19 октября 2020 г.*

Для приборов с гетероструктурами в качестве активных элементов особое значение имеют свойства границ раздела, которые зачастую играют определяющую роль в работе таких устройств. Совершенствование характеристик полупроводниковых приборов невозможно без детального анализа процессов, происходящих на интерфейсах гетеропереходов. Вместе с тем результаты в значительной степени зависят от чистоты исходных материалов и технологии изготовления слоев. Кроме того, непрерывно возрастают требования к составу примеси и ее распределению. Соответственно, повышаются требования к методам контроля распределения примеси и основных носителей заряда как на этапе лабораторной разработки структуры, так и на стадии производства полупроводникового прибора. В данной работе представлены результаты диагностики распределения концентрации основных носителей заряда в полупроводниковых структурах методом электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV-профилирования). Метод не требует специальной подготовки образцов, нанесения контактов для проведения испытаний и позволяет получать данные не только о распределении примеси, но и о распределении свободных носителей заряда. Он также дает возможность верифицировать толщины слоев полупроводниковых гетероструктур. Для повышения разрешения метода проведена модификация стандартного электрохимического профилометра. Приведены данные картографирования подложечной структуры GaAs, профили распределения концентрации основных носителей заряда в структурах SiC, GaAs структуре с *p-n*-переходом, pHEMT-гетероструктуре, GaN гетероструктуре с множественными квантовыми ямами и гетероструктурном солнечном элементе на основе кремния. Полученные результаты могут быть использованы для анализа физических свойств и явлений в полупроводниковых приборах, использующих квантово-размерные слои, а также для совершенствования и улучшения параметров существующих электронных приборов.

Ключевые слова: электрохимическое вольт-фарадное профилирование (ECV-профилирование); диагностика; полупроводники.

DIAGNOSTICS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES BY ELECTROCHEMICAL CAPACITANCE-VOLTAGE PROFILING TECHNIQUE

© **Georgy E. Yakovlev***, **Dmitry S. Frolov**, **Vasily I. Zubkov**

St. Petersburg State Electrotechnical University "LÉTI", 5, ul. Prof. Popova, St. Petersburg, 197376, Russia;
*e-mail: geyakovlev@etu.ru

Received July 9, 2020. Revised August 11, 2020. Accepted October 19, 2020.

The properties of interfaces in the heterostructures which frequently govern their operation are of particular importance for the devices containing heterostructures as active elements. Any further improving of the characteristics of semiconductor devices is impossible without a detail analysis of the processes occurring at the interfaces of heterojunctions. At the same time, the results largely depend on the purity of the starting materials and the technology of layer manufacturing. Moreover, the requirements to the composition and distribution of the impurity steadily get stringent. Therefore, the requirements regarding the methods of the impurity control and carrier distribution also become tougher both in the stage of laboratory development of the structure and in various stages of manufacturing of semiconductor devices. Electrochemical capacitance-voltage profiling is distinguished among the methods of electrical diagnostics of semiconductors by the absence of special preparation of the structures and deposition of the contacts to perform measurements, thus providing for gaining information not only about the impurity distribution but also about the distribution of free carriers. The goal of this work is to perform precise measurements of the profiles of free carrier distribution in semiconductor structures of different types, and demonstrate

the measuring capabilities of a modern technique for concentration distribution diagnostics, i.e., electrochemical capacitance-voltage profiling. The method allows verification of the layer thickness in semiconductor heterostructures and provide a useful and informative feedback to technologists. To increase the resolution of the method and broad up the range of available test frequencies, a standard electrochemical profiler has been modified. Mapping data for GaAs substrate structure, the profiles of the concentration distribution of the majority charge carriers in SiC structures, GaAs structure with a $p-n$ junction, pHEMT heterostructure, GaN heterostructure with multiple quantum wells, and in a silicon-based solar cell heterostructure are presented. The obtained results can be used to analyze the physical properties and phenomena in semiconductor devices with quantum-sized layers, as well as to improve and refine the parameters of existing electronic devices.

Keywords: ECV-profiling; diagnostics; semiconductors.

Введение

Современные приборы микроэлектроники могут включать в качестве основы полупроводниковые гетероструктуры с десятками слоев переменного состава и уровня легирования толщиной до нескольких нанометров. Повышение требований к производству таких структур приводит к тому, что диагностика их параметров становится основным фактором. Вместе с тем совершенствование характеристик полупроводниковых приборов невозможно без детального анализа процессов, происходящих на границах раздела гетеропереходов.

Цель работы — диагностика распределения концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) в полупроводниковых структурах различных типов методом электрохимического вольт-фарадного профилирования.

Материалы, методика, оборудование

Электрохимическое вольт-фарадное профилирование (ECV-профилирование) — модификация классического метода вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [1, 2].

Контакт электролит — полупроводник образует переход, схожий с контактом Шоттки [3, 4]. При этом применение жидкого электролита для создания выпрямляющего контакта и травления материала дает возможность осуществлять оба процесса в одной электрохимической ячейке. Это в свою очередь позволяет автоматизировать измерение профиля ОНЗ по глубине структуры.

Методом ECV-профилирования можно верифицировать толщины слоев полупроводниковых гетероструктур. В отличие от традиционных вольт-фарадных испытаний, при которых глубина профилирования определяется шириной области объемного заряда (ООЗ) при заданном смещении и ограничена напряжением пробоя [5], с помощью ECV-метода можно измерять распределение концентрации на глубине в десятки микрометров. Заметим, что для большинства эпитаксиальных структур травление глубже 1 мкм не требуется.

Электрохимическое травление полупроводника выполняют путем соответствующего выбора потенциала электрода. Для материала с дырочным типом проводимости (p -типа) этот потенциал находится в области прямого смещения, т.е. рабочий электрод (на образце) должен иметь положительный потенциал относительно потенциала в электрохимической ячейке [6]. В случае материала с электронным типом проводимости (n -типа) используют обратное смещение. Для травления применяют подсветку с соответствующей длиной волны излучения.

Скорость травления полупроводника пропорциональна току I , протекающему через границу раздела полупроводник — электролит. Глубину травления x_r определяют по электрохимическому закону Фарадея [7]:

$$x_r = \frac{M}{zF\rho S} \int_0^{t_0} I(t)dt, \quad (1)$$

где M — молекулярный вес травящегося материала; z — валентное число ионов вещества; F — постоянная Фарадея; ρ — плотность материала; S — площадь контакта полупроводник — электролит; t — время.

Ширина ООЗ x_d составит

$$x_d = (\varepsilon\varepsilon_0 S^2)/C, \quad (2)$$

где C — измеряемая прибором барьерная емкость; ε , ε_0 — диэлектрические проницаемости полупроводника и вакуума.

Концентрацию ОНЗ на границе ООЗ (на глубине $x_r + x_d$) находят стандартным для вольт-фарадных измерений способом (через производную емкости C по приложенному напряжению U):

$$n(x_r + x_d) = -\frac{C^3}{q\varepsilon\varepsilon_0 S^2} \left(\frac{dC}{dU} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где q — заряд электрона.

Испытания проводили на автоматизированной установке электрохимического вольт-фарадного профилирования ECVPro компании Nanometrics (диапазон измерения распределения кон-

центрации OH^- — $10^{12} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$, класс исследуемых полупроводниковых материалов включает полупроводники IV группы (Si, $\alpha\text{-Si:H}$, Ge, SiC), групп A3B5 (GaAs, GaP, InAs, InP) и A2B6 (ZnO, CdTe, HgCdTe), нитриды (GaN, AlGaN, InGaN, AlInN) и др.). Установка позволяла измерять профиль распределения концентрации OH^- в двух режимах: профилирование границей OO_3 (depletion mode) или посредством электрохимического травления (etching mode). Встроенная электроника исключала дрейф прибора и обеспечивала уверенное соотношение сигнал/шум, а система циркуляции электролита (debubbling) поддерживала равномерное травление материала. Состояние поверхности исследуемого образца во время профилирования контролировали с помощью установленной в профилометре видекамеры. Благодаря тому, что ECV-профилирование калибровали для каждого испытания [8], погрешность измерения концентрации свободных носителей заряда не превышала нескольких процентов [9]. Реализованный в ECVPro подход измерения на двух частотах [10] позволял находить полное решение для трехкомпонентной эквивалентной схемы испытаний, что актуально для образцов с толстой слаболегированной подложкой. Спектр излучения ртутно-ксеноновой лампы высокого давления L8251 (200 Вт) — источника УФ-излучения в установке — давал возможность проводить травление в том числе и широкозонных полупроводников.

Однако при всех достоинствах на установке ECVPro невозможны, например, профилирование квантовой ямы (КЯ) вблизи металлургической границы p - n -перехода, измерение гетероструктурных $\alpha\text{-Si:H}$ солнечных элементов через проводящие слои оксида индия-олова (ITO), а также получение достаточного по глубине разрешения при измерении структур с профилем легирования типа low-high, корректного значения концентрации в низколегированных узкозонных полупроводниках и др. [5, 11 – 14]. Поэтому для расширения спектра исследуемых полупроводниковых приборов дополнительно использовали автоматизированный измерительный модуль на основе платформы NI PXI-1042Q (рис. 1).

Управление оборудованием и обработка сигнала в модуле осуществлялись с применением программного обеспечения NI LabVIEW. Внешний RLC-метр Agilent E4980A подключался через набор реле (вместо встроенного измерителя емкости в ECVPro). Реле управлялось источником-измерителем NI PXI-4132, который использовался также для синхронизации времени переключения реле со временем начала работы RLC-метра. Генерация напряжения смещения и переменного сигнала осуществлялась с помощью генератора сигналов NI PXI-5412, подключенного к электро-

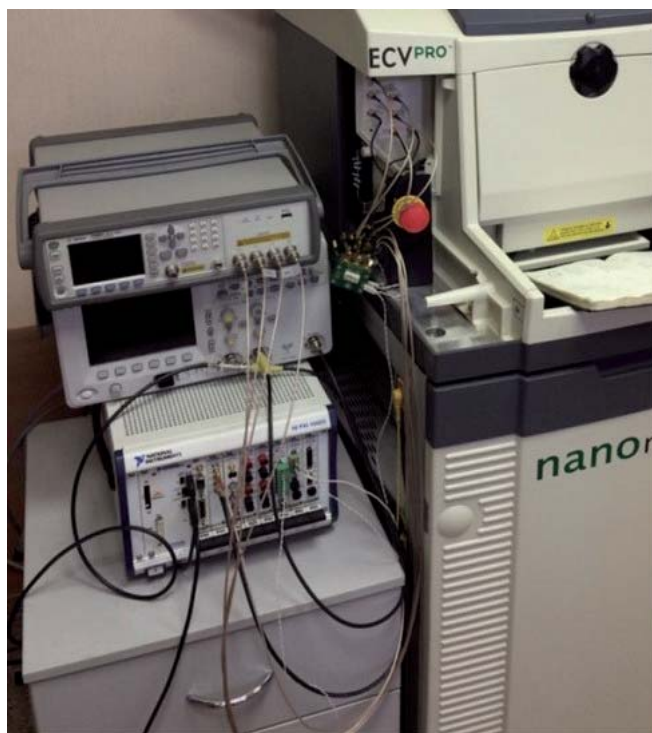


Рис. 1. Измерительный модуль на базе RLC-метра Agilent E4980A и модульной платформы NI PXI-1042Q

Fig. 1. The measuring module based on an Agilent E4980A RLC-meter and NI PXI-1042Q modular platform

химической ячейке ECVPro через операционный усилитель, включенный по схеме потенциостата.

Подключение RLC-метра к электрохимической ячейке по четырехпроводной схеме позволяло уменьшить паразитное влияние последовательного сопротивления электролита и омических контактов к образцу. Напряжение смещения ограничивалось диапазоном работы RLC-метра ($\pm 40 \text{ В}$).

Модифицированную установку тестировали и калибровали с использованием дискретных емкостей и резисторов.

В результате модификации ECV-профилометра за счет подключения внешнего RLC-метра с точностью подачи напряжения до 1 мВ повысилось разрешение измерителя по координате и расширился частотный диапазон при измерении ВФХ с 10 кГц до 2 МГц. Это сделало возможным профилирование КЯ, расположенных вблизи максимума распределения напряженности электрического поля p - n -перехода [11, 12].

В измерительном модуле были реализованы два подхода: измерение неравновесных ВФХ и емкости в широком диапазоне частот [15]. Первый позволял избежать ошибок, связанных с накоплением подвижных носителей заряда на поверхности узкозонного полупроводника (так, в n -InAs с шириной запрещенной зоны 0,35 эВ была решена проблема завышенной наблюдае-

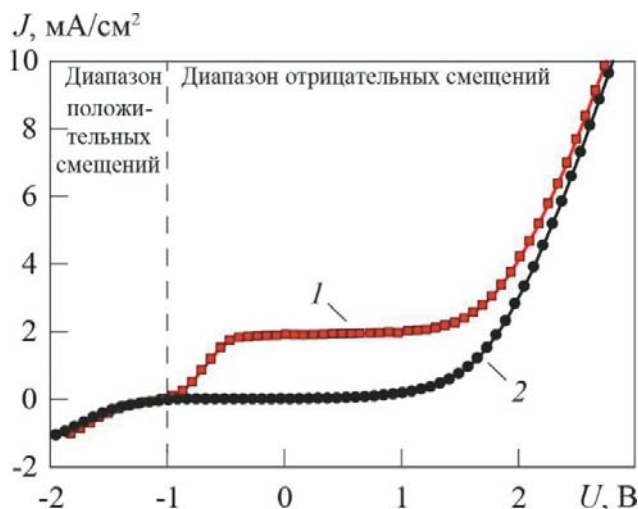


Рис. 2. ВАХ подложки GaAs, полученные с подсветкой (1) и без (2)

Fig. 2. The current-voltage curve of GaAs substrate obtained with (1) and without illumination (2)

мой концентрации ОНЗ). Второй был наиболее эффективен при измерении широкозонных материалов с неполной ионизацией примеси (отдельно профили распределения концентрации ОНЗ и примеси становились доступны для измерения в условиях комнатной температуры при использовании ECV-профилометра на разных частотах тестового сигнала [15]). Таким образом, исключалась необходимость дополнительных испытаний с использованием вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

Обсуждение результатов

Исследовали подложку арсенида галлия *n*-типа (концентрация легирующей примеси — $1,2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Отметим, что ECV-метод предполагает соответствующую подготовку образца, выбор и приготовление электролита и др. [16].

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) подложки GaAs (J — плотность тока, вертикальная штриховая линия — восстановленная граница истинных положительных и отрицательных смещений (т.е. 0 В — в абсолютной шкале, а не относительно платинового электрода сравнения)). Видно, что ВАХ образца, имеющие стандартный вид [17], немного смещены по напряжению относительно нуля. Это связано с тем, что потенциалы в электрохимической ячейке установки измерялись относительно электрода сравнения [18].

По величине напряжения на разомкнутой электрохимической ячейке (точка пересечения двух ВАХ) можно оценить сдвиг характеристик относительно начала отсчета и определить тип носителей заряда в полупроводнике. Отрица-

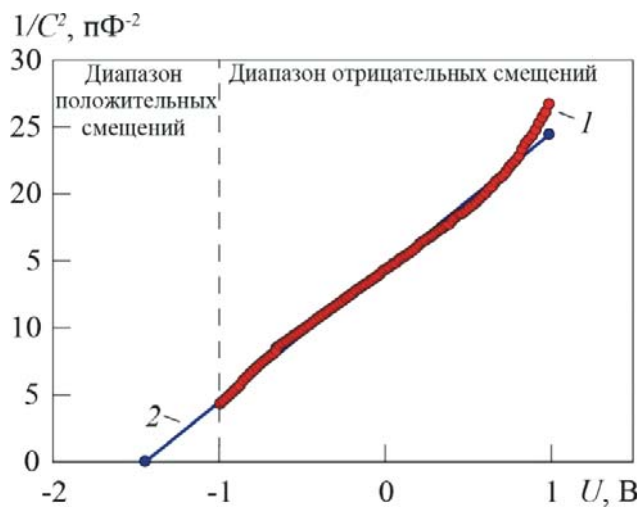


Рис. 3. ВФХ подложки GaAs (1) и линейная аппроксимация (2)

Fig. 3. The current-voltage curve of GaAs substrate (1) and the linear approximation (2)

тельный сдвиг потенциала характеризует *n*-тип, положительный — *p*-тип. Заметим, что определение типа носителей может быть некорректным, если в исследуемой структуре присутствуют несколько слоев с разным типом проводимости или в случае слишком высокого уровня легирования.

По ВАХ определяли напряжение травления и оптимальный диапазон напряжений, соответствующий области постоянной плотности тока при подсветке. С их помощью измеряли ВФХ образца (рис. 3).

Получили, что ВФХ имеют незначительное отклонение от линейности в области 0,75–1 В, связанное с возрастанием плотности тока. Поэтому рабочую точку для корректного измерения концентрации в режиме травления выбирали в середине линейного участка ВФХ (–0,33 В).

Чередуя электрохимическое травление и вольт-фарадные измерения [19, 20], оценивали распределение концентрации ОНЗ по глубине структуры (рис. 4).

Заметим, что измерительная точка на концентрационном профиле определяется шириной ООЗ при данном уровне легирования. При этом, ввиду фундаментального ограничения, она не может располагаться от поверхности на расстоянии менее 2–3 дебаевских длин экранирования.

Разрешение по координате концентрационного профиля также ограничено дебаевской длиной экранирования [5]. В свою очередь точность определения концентрации зависит от погрешности измерения емкости ΔC [21]:

$$\Delta C = -\frac{C \Delta U \epsilon \epsilon_0}{q x_d^2 n (x_r + x_d)}. \quad (4)$$

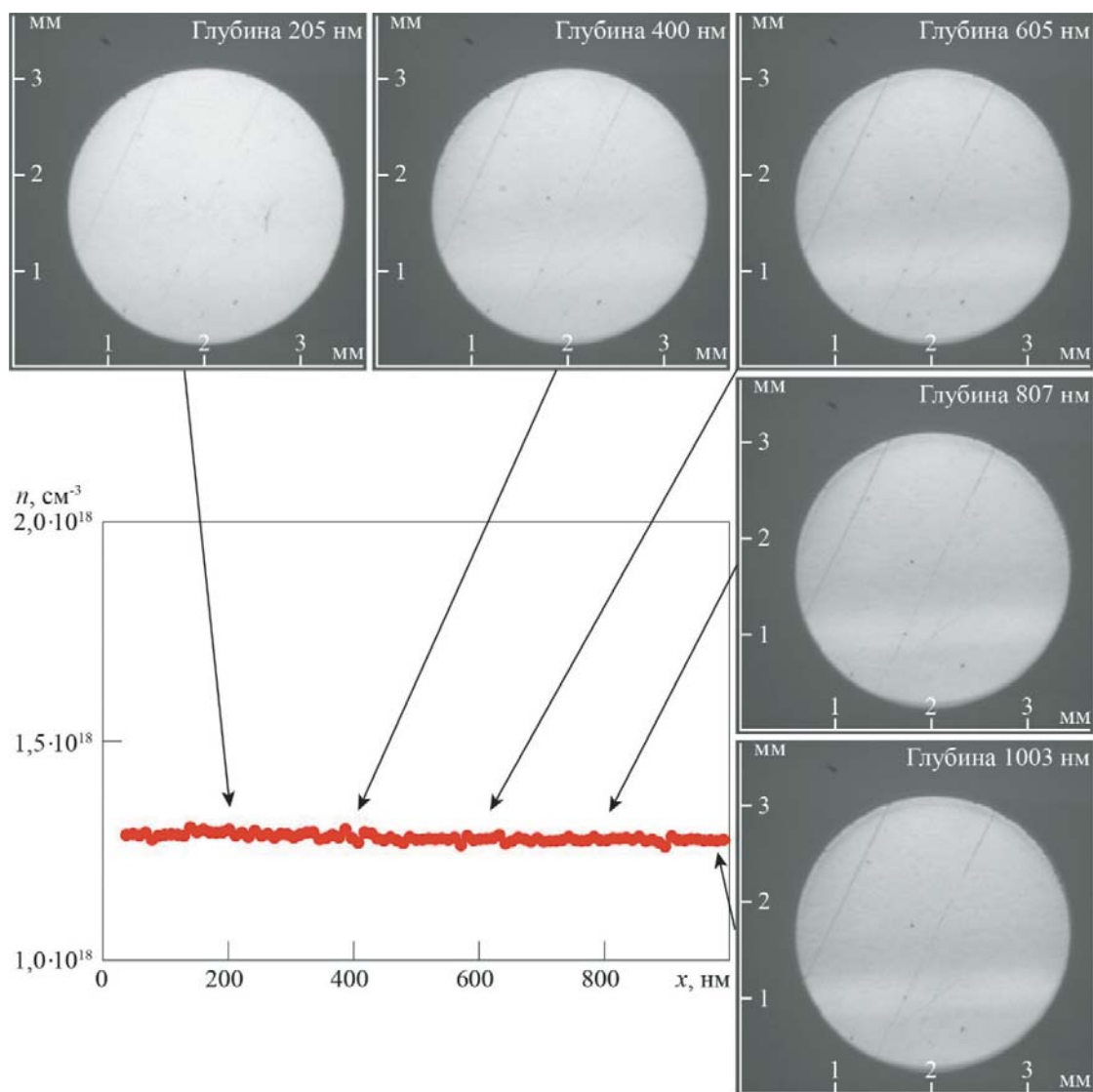


Рис. 4. Распределение концентрации электронов n по глубине x подложки GaAs в одной измерительной точке (на врезках — поверхности кратера травления)

Fig. 4. Distribution of the electron concentration n in depth x of GaAs substrate at a single measurement point (in the insets — the etching crater surface)

По мере профилирования соотношение сигнал/шум в измеряемом концентрационном профиле уменьшается. Этот эффект, однако, достаточно успешно подавляется в ESCVPro за счет применяемой обратной связи [22].

По поверхности кратера травления (см. рис. 4) видно, что при оптимальных параметрах испытания модификация поверхности не наблюдается даже на глубине 1 мкм. Поскольку активные слои приборных структур располагаются, как правило, в области до 300 нм от поверхности, это гарантирует достоверность получаемых результатов.

В процессе калибровки режима травления подбирали оптимальные параметры эксперимента (ток травления, уровень освещенности образца, концентрация электролита и др.). Неудачный

выбор, например, тока ведет к увеличению шероховатости дна кратера травления и, соответственно, росту эффективной площади контакта. Следствием этого будет занижение наблюдаемой концентрации электронов в процессе профилирования (рис. 5). Кроме того, повышение скорости бокового протравки и неравномерного латерального травления могут приводить к деградации поверхности кратера (рис. 6). При оптимальных параметрах эксперимента значение концентрации практически постоянно по мере травления (меняется лишь в третьем знаке после запятой).

Качество поверхности кратера контролировали также с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 7). Получили, что до травления средняя величина шероховатости Z составляла 2,

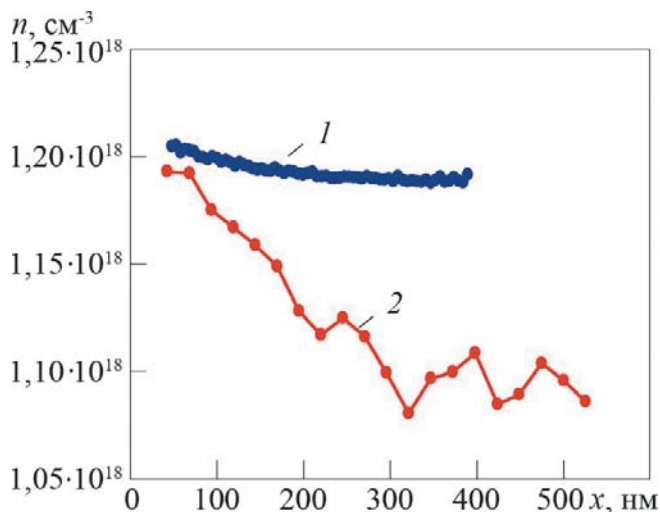


Рис. 5. Распределение электронов n по глубине x подложки GaAs при оптимальных (1) и неоптимальных параметрах измерений (2)

Fig. 5. Distribution of the electron concentration n in depth x of GaAs substrate at optimal (1) and non-optimal (2) parameters of measurements

после — 1,5 нм (RMS 0,441 и 0,337 нм соответственно). Это свидетельствует о том, что поверхность при ECV-профилировании практически не изменилась, а выбор электролита и параметров испытаний был корректным.

Распределение концентрации электронов по площади подложки представлено на рис. 8 (среднеквадратичное отклонение среднего по пластине — менее 7 %).

Достоверные испытания многослойных гетероструктур с КЯ и областями резкого неоднородного легирования невозможны без предварительной калибровки и верификации на более «простых» структурах с заранее известными параметрами. На рис. 9 приведены результаты измерений концентрации ОНЗ в подложечных образцах SiC p - и n -типов легирования ($\sim 9 \cdot 10^{16}$ и $\sim 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно). Отметим, что положение первой измерительной точки в эксперименте определяется величиной легирования

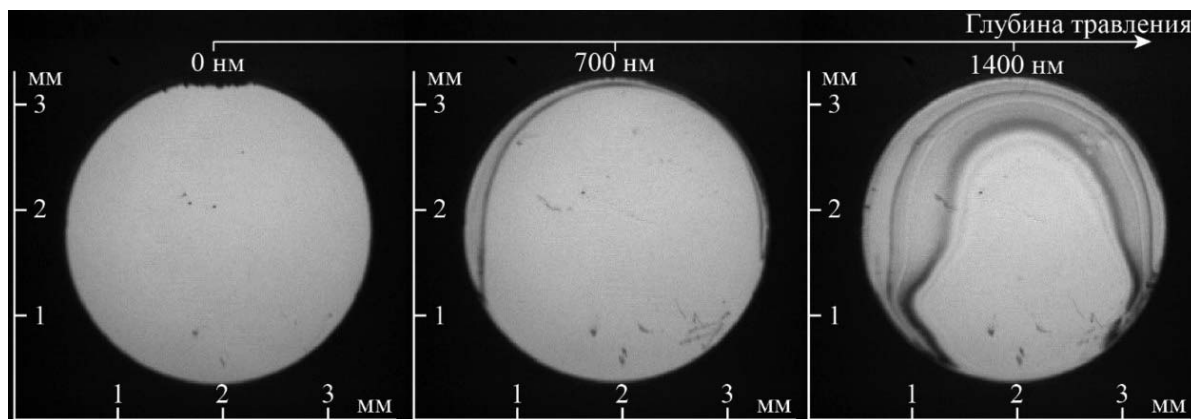


Рис. 6. Поверхность кратера травления при неоптимальных параметрах измерений

Fig. 6. The etching crater surface at non-optimal measurement parameters

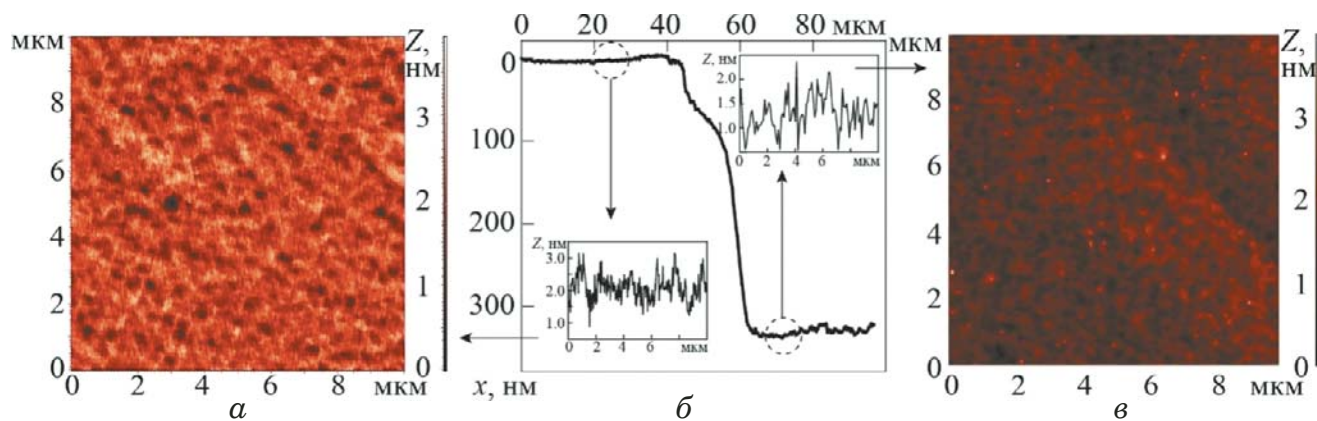


Рис. 7. Поверхность подложки GaAs до (а) и после травления (в), АСМ-профиль кратера травления (б) (на вставках (указаны стрелками) — соответствующие значения шероховатости Z)

Fig. 7. The surface of GaAs substrate before (a) and after etching (c), AFM etching pit crater profile (b) (in the insets (indicated by arrows) — the corresponding roughness values Z)

структуры — начальной величиной ООЗ под электролитическим барьером.

ECV-методом определяли металлургическую границу p - n -перехода (рис. 10).

На профиле распределения концентрации ОНЗ по глубине образца p^+ - p - n -структуры на основе GaAs можно выделить три характерных участка: сильнолегированный p^+ -слой (глубина от поверхности до 2 мкм), слаболегированный p -слой (2 – 4 мкм) и n -слой (подложка) (более 4 мкм вглубь структуры). Металлургическая граница расположена на глубине 4 мкм и выделяется характерными для ECV-профилеирования концентрационными всплесками по обе стороны.

Результаты испытаний образцов рНЕМТ-гетероструктуры с участками резкого изменения распределения концентрации и гетероструктуры с множественными КЯ InGaN/GaN представлены на рис. 11.

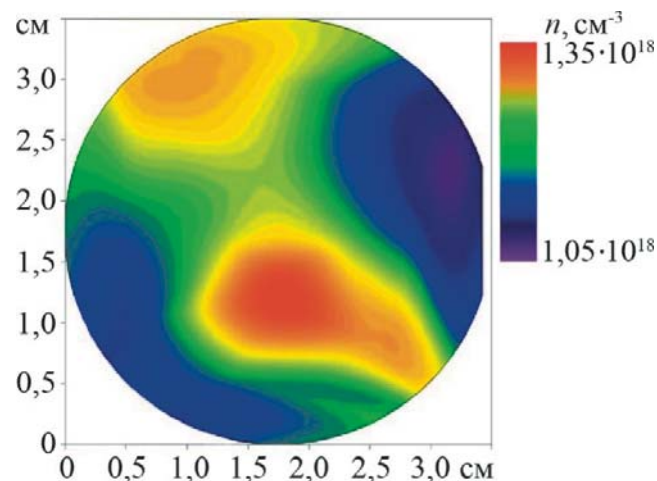


Рис. 8. Распределение концентрации электронов n по площади подложки GaAs

Fig. 8. Distribution of the electron concentration n over the GaAs substrate surface

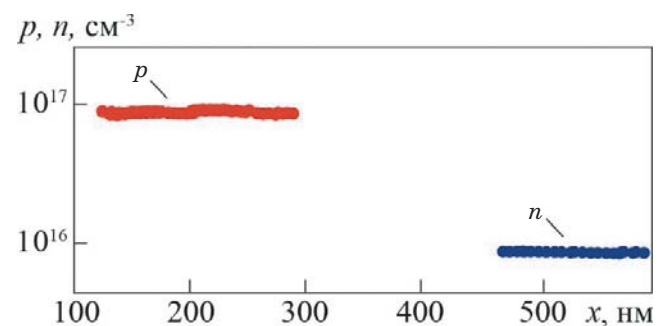


Рис. 9. Распределение концентраций ОНЗ по глубине x в образцах SiC p - и n -типов легирования соответственно

Fig. 9. Concentration distribution of the majority charge carriers in depth x of p - and n -type doped SiC samples

На профиле (рНЕМТ-гетероструктура) прослеживаются контактная область сильнолегированного n^+ -слоя (глубина от поверхности до 45 нм), нелегированный барьерный слой (45 – 80 нм), n^+ -донорный слой (более 90 нм) и область КЯ In_{0.22}Ga_{0.78}As (110 нм).

Заметим, что в структуре присутствовали слои AlGaAs. Известно, что по мере увеличения доли алюминия в твердом растворе повышается и сложность травления. В данном случае слой AlGaAs выступал в качестве так называемого стоп-слоя — индикатора достижения необходимой глубины травления для последующего заглубления затвора в этой области.

Испытания показали, что КЯ In_{0.15}Ga_{0.85}N на n -GaN подложке отделяются друг от друга GaN спейсерами толщиной 10 нм. Период и толщина КЯ (2 нм) хорошо согласуются со спецификацией структуры.

Сквозным электрохимическим профилированием структуры солнечного элемента на основе α -Si/Si НЖТ-гетероструктуры [12] установили, что концентрация ОНЗ меняется от $5 \cdot 10^{15}$ (в глубине монокристаллической Si подложки) до $\sim 1 \cdot 10^{22}$ см⁻³ (в поверхностном слое ИТО) (рис. 12).

Метод ECV-профилеирования в отличие от других подходов позволил измерить профиль распределения концентрации ОНЗ в материале, который фактически является полуметаллом [23 – 26]. Кроме того, постоянное значение концентрации вблизи поверхности дает возможность определить положение гетерограницы между слоями ИТО и аморфного полупроводника раз-

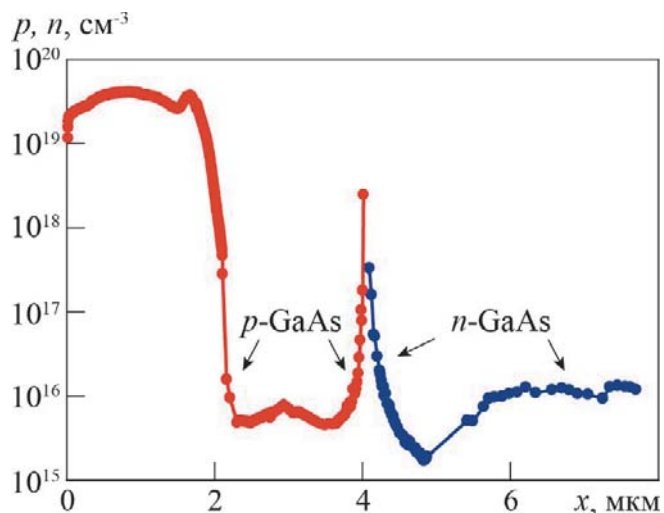


Рис. 10. Распределение концентраций дырок p и электронов n по глубине x образца p^+ - p - n -структуры на основе GaAs

Fig. 10. Concentration distributions of holes p and electrons n in depth x of GaAs-based p^+ - p - n -structure

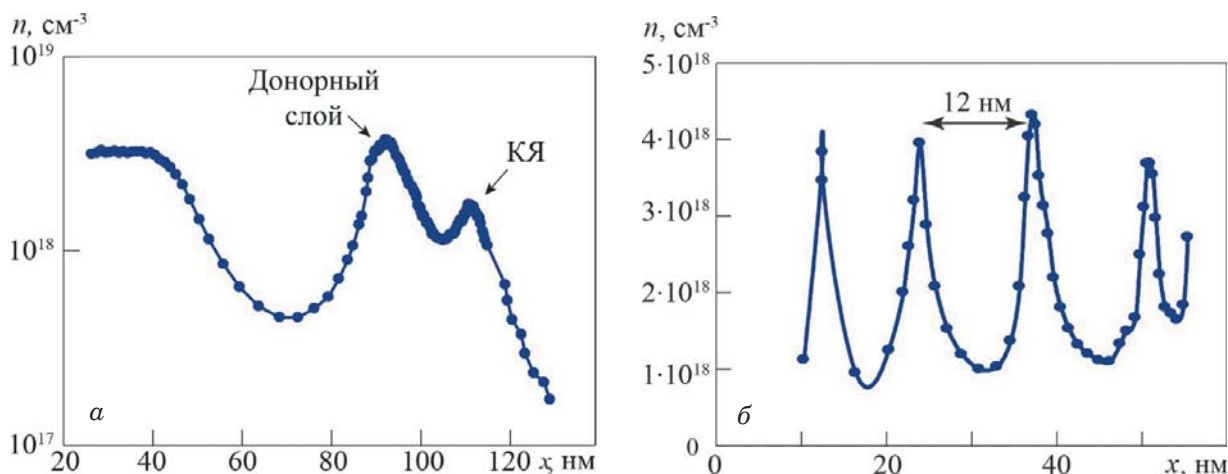


Рис. 11. Распределение концентрации электронов n по глубине x образцов pHEMT-гетероструктуры (а) и гетероструктуры с множественными КЯ InGaN/GaN (б)

Fig. 11. Distribution of electron concentration n in depth x of pHEMT heterostructure (а) and InGaN/GaN heterostructure with multiple quantum wells (б)

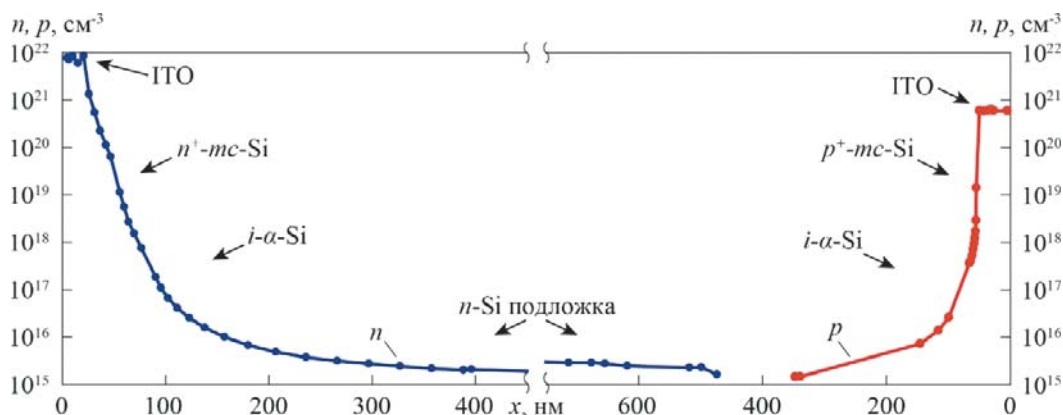


Рис. 12. Распределения концентраций электронов n и дырок p по глубине x солнечного элемента на основе α -Si/Si HJT-гетероструктуры

Fig. 12. Concentration distribution of electrons n and holes p in depth x of HJT solar cell heterostructure

личного типа проводимости и, соответственно, толщины слоев ИТО.

Заключение

Метод электрохимического вольт-фарадного профилирования позволяет с высокой чувствительностью (большей, чем у метода ВИМС) и информативностью диагностировать современные полупроводниковые материалы и структуры. Методом ECV-профилирования проведено картографирование подложечной структуры GaAs, получены профили распределения концентрации ОНЗ в подложечных структурах SiC, GaAs структуре с p - n -переходом, GaAs pHEMT-гетероструктуре, GaN гетероструктуре с множественными КЯ и гетероструктурном солнечном элементе на основе кремния. Алгоритм прецизионного определения параметров полупроводниковых материалов отработан на пластине GaAs с

известной концентрацией. Полученные результаты полностью совпали со специфицированным значением концентрации примеси.

С помощью модифицированной стандартной установки ECVPro реализованы алгоритмы измерения нестационарных ВФХ, а также методика измерения концентрации в диапазоне частот. Это снимает ряд ограничений ECV-метода, давая возможность проводить диагностику широкого класса полупроводниковых приборов, среди которых светодиодные и лазерные структуры [11], биполярные транзисторные и HEMT-структуры [27], фотонно- и электронно-чувствительные ПЗС структуры с имплантационным профилем [28], гетероструктурные солнечные элементы [12].

Благодарности

Авторы выражают благодарность А. В. Соломниковой (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») за помощь в

проведении АСМ-измерений, а также за ценные консультации при написании статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Blood P., Orton J.** The electrical characterization of semiconductors: majority carriers and electron states. — London: Acad. Press, 1992. — 768 p.
- Ambridge T., Faktor M.** An automatic carrier concentration profile plotter using an electrochemical technique / *J. Appl. Electrochem.* 1975. Vol. 5. N 4. P. 319 – 328. DOI: 10.1007/BF00608796.
- Ambridge T., Faktor M.** Electrochemical Capacitance Characterization of N-Type Gallium Arsenide / *J. Appl. Electrochem.* 1974. Vol. 4. N 2. P. 135 – 142. DOI: 10.1007/BF00609022.
- Bisquert J., Cendula P., Bertoluzzi L., Gimenez S.** Energy Diagram of Semiconductor/Electrolyte Junctions / *J. Phys. Chem. Lett.* 2014. Vol. 5. N 1. P. 205 – 207. DOI: 10.1021/jz402703d.
- Зубков В. И.** Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса. — СПб.: Элмор, 2007. — 220 с.
- Дамаскин В. Б., Петрий О. А., Цирлина Г. А.** Электрохимия. — М.: Химия, КолосС, 2006. — 672 с.
- Брунков П. Н., Гуткин А. А., Рудинский М. Э. и др.** Электрохимическое вольт-емкостное профилирование концентрации свободных носителей заряда в HEMT-гетероструктурах на основе соединений InGaAs/AlGaAs/GaAs / *ФТП.* 2011. Т. 45. № 6. С. 829 – 835.
- SEMI M461101 Test Method for Measuring Carrier Concentrations in Epitaxial Layer Structures by ECV Profiling. — CA: SEMI, 2009. — 8 p.
- Mayes I.** Accuracy and Reproducibility of the Electrochemical Profiler / *Mater. Sci. Eng. B.* 2001. Vol. 80. N 13. P. 160 – 163. DOI: 10.1016/S0921-5107(00)00610-3.
- Califano F., Luciano A.** An Automatic Test Set for Measuring the Doping Profile of Semiconductor Epitaxial Layers / *Rev. Sci. Instrum.* 1970. Vol. 41. N 6. P. 865 – 869. DOI: 10.1063/1.1684664.
- Yakovlev G., Zubkov V., Solomnikova A., Derevianko O.** Electrochemical capacitance-voltage profiling of nonuniformly doped GaAs heterostructures with SQWs and MQWs for LED applications / *Turk. J. Phys.* 2018. Vol. 42. N 4. P. 433 – 442. DOI: 10.3906/fiz-1803-23.
- Яковлев Г. Е., Няшпаев И. А., Шахрай И. С. и др.** Сквозное концентрационное профилирование гетероструктурных солнечных элементов / *ПЖТФ.* 2019. Т. 45. № 17. С. 39 – 42.
- Olsson L., Andersson C., Hakansson M., Kanski J., et al.** Charge Accumulation at InAs Surfaces / *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 76. N 19. P. 3626 – 3629. DOI: 10.1103/PhysRevLett.76.3626.
- Gopal V., Chen E., Kvam E., Woodall J.** Electrochemical Capacitance Voltage Profiling of the Narrow Band Gap Semiconductor InAs / *J. Electron. Mater.* 2000. Vol. 29. N 11. P. 1333 – 1339. DOI: 10.1007/s11664-000-0134-0.
- Frolov D. S., Zubkov V. I.** Frequency dispersion of capacitance-voltage characteristics in wide bandgap semiconductor-electrolyte junctions / *Semicond. Sci. Technol.* 2016. Vol. 31. N 12. P. 125013. DOI: 10.1088/0268-1242/31/12/125013.
- Фролов Д. С., Яковлев Г. Е., Зубков В. И.** Техника электрохимического вольт-фарадного профилирования сильно легированных структур с резким профилем распределения примеси / *ФТП.* 2019. Т. 53. № 2. С. 281 – 286.
- Лукомский Ю. Я., Гамбург Ю. Д.** Физико-химические основы электрохимии. — Долгопрудный: Интеллект, 2008. — 424 с.
- Bard A., Stratman M.** Encyclopedia of Electrochemistry. — Weinheim: WILEY-VCH, 2007. — 410 p.
- Clawson A. R.** Guide to references on III – V semiconductor chemical etching / *Mater. Sci. Eng. R. Rep.* 2001. Vol. 31. N 1 – 6. P. 1 – 438. DOI: 10.1016/S0927-796X(00)00027-9.
- Ambridge T., Stevenson J., Redstall R.** Applications of Electrochemical Methods for Semiconductor Characterization / *J. Electrochem. Soc.* 1980. Vol. 127. N 1. P. 222 – 228. DOI: 10.1149/1.2129623.
- Amron I.** Errors in Dopant Concentration Profiles Determined by Differential Capacitance Measurements / *Electrochem. Technol.* 1967. Vol. 5. P. 94 – 97.
- Blood P.** Capacitance-Voltage Profiling and the Characterisation of III – V Semiconductors Using Electrolyte Barriers / *Semicond. Sci. Technol.* 1986. Vol. 1. N 1. P. 7 – 27. DOI: 10.1088/0268-1242/1/1/002.
- Facchetti A., Marks T.** Transparent Electronics: From Synthesis to Applications. — Hoboken: John Wiley and Sons, 2010. — 470 p.
- Амосова Л. П.** Электрооптические свойства и структурные особенности аморфного ИТО / *ФТП.* 2015. Т. 49. № 3. С. 426 – 430.
- Tahar R., Van T., Ohya Y., Takahashi Y.** Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties / *J. Appl. Phys.* 1998. Vol. 83. N 5. P. 2631 – 2645. DOI: 10.1063/1.367025.
- Аболмасов С. Н., Абрамов А. С., Иванов Г. А. и др.** Гетероструктурные солнечные элементы на основе монокристаллического кремния с контактной сеткой, напечатанной на принтере методом струйной печати / *ПЖТФ.* 2017. Т. 43. № 1. С. 74 – 79.
- Яковлев Г. Е., Дорохин М. В., Зубков В. И. и др.** Особенности электрохимического вольт-фарадного профилирования арсенидгаллиевых светоизлучающих и рHEMT структур с квантоворазмерными областями / *ФТП.* 2018. Т. 52. № 8. С. 873 – 880.
- Яковлев Г. Е., Фролов Д. С., Зубкова А. В. и др.** Исследование ионно-имплантированных фоточувствительных кремниевых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования / *ФТП.* 2016. Т. 50. № 3. С. 324 – 330.

REFERENCES

- Blood P., Orton J.** The electrical characterization of semiconductors: majority carriers and electron states. — London: Acad. Press, 1992. — 768 p.
- Ambridge T., Faktor M.** An automatic carrier concentration profile plotter using an electrochemical technique / *J. Appl. Electrochem.* 1975. Vol. 5. N 4. P. 319 – 328. DOI: 10.1007/BF00608796.
- Ambridge T., Faktor M.** Electrochemical Capacitance Characterization of N-Type Gallium Arsenide / *J. Appl. Electrochem.* 1974. Vol. 4. N 2. P. 135 – 142. DOI: 10.1007/BF00609022.
- Bisquert J., Cendula P., Bertoluzzi L., Gimenez S.** Energy Diagram of Semiconductor/Electrolyte Junctions / *J. Phys. Chem. Lett.* 2014. Vol. 5. N 1. P. 205 – 207. DOI: 10.1021/jz402703d.
- Zubkov V. I.** Diagnostic of semiconductor nanoheterostructures by means of admittance spectroscopy. — St. Petersburg: Elmor, 2007. — 220 p. [in Russian].
- Damaskin V. B., Petrii O. A., Tsirlina G. A.** Electrochemistry. — Moscow: Khimiya, KolosS, 2006. — 672 p. [in Russian].
- Brunkov P. N., Gutkin A. A., Rudinsky M. É., et al.** Electrochemical capacitance-voltage profiling of the free-carrier concentration in HEMT heterostructures based on InGaAs/AlGaAs/GaAs compounds / *Fiz. Tekn. Poluprovodn.* 2011. Vol. 45. N 6. P. 829 – 835 [in Russian].
- SEMI M461101 Test Method for Measuring Carrier Concentrations in Epitaxial Layer Structures by ECV Profiling. — CA: SEMI, 2009. — 8 p.
- Mayes I.** Accuracy and Reproducibility of the Electrochemical Profiler / *Mater. Sci. Eng. B.* 2001. Vol. 80. N 13. P. 160 – 163. DOI: 10.1016/S0921-5107(00)00610-3.
- Califano F., Luciano A.** An Automatic Test Set for Measuring the Doping Profile of Semiconductor Epitaxial Layers / *Rev. Sci. Instrum.* 1970. Vol. 41. N 6. P. 865 – 869. DOI: 10.1063/1.1684664.
- Yakovlev G., Zubkov V., Solomnikova A., Derevianko O.** Electrochemical capacitance-voltage profiling of nonuniformly

- doped GaAs heterostructures with SQWs and MQWs for LED applications / *Turk. J. Phys.* 2018. Vol. 42. N 4. P. 433 – 442. DOI: 10.3906/fiz-1803-23.
12. **Yakovlev G. E., Nyapshaev I. A., Shakhrai I. S., et al.** Through Concentration Profiling of Heterojunction Solar Cells / *Technical Physics Letters*. 2019. Vol. 45. N 17. P. 39 – 42 [in Russian].
 13. **Olsson L., Andersson C., Hakansson M., Kanski J., et al.** Charge Accumulation at InAs Surfaces / *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 76. N 19. P. 3626 – 3629. DOI: 10.1103/PhysRevLett.76.3626.
 14. **Gopal V., Chen E., Kvam E., Woodall J.** Electrochemical Capacitance Voltage Profiling of the Narrow Band Gap Semiconductor InAs / *J. Electron. Mater.* 2000. Vol. 29. N 11. P. 1333 – 1339. DOI: 10.1007/s11664-000-0134-0.
 15. **Frolov D. S., Zubkov V. I.** Frequency dispersion of capacitance-voltage characteristics in wide bandgap semiconductor-electrolyte junctions / *Semicond. Sci. Technol.* 2016. Vol. 31. N 12. P. 125013. DOI: 10.1088/0268-1242/31/12/125013.
 16. **Frolov D. S., Yakovlev G. E., Zubkov V. I.** Technique for the Electrochemical Capacitance-Voltage Profiling of Heavily Doped Structures with a Sharp Doping Profile / *Fiz. Tekn. Poluprovodn.* 2019. Vol. 53. N 2. P. 281 – 286 [in Russian].
 17. **Lukomsky Yu. Ya., Gamburg Yu. D.** Physical and chemical fundamentals of electrochemistry. — Dolgoprudny: Intellect, 2008. — 424 p. [in Russian].
 18. **Bard A., Stratman M.** Encyclopedia of Electrochemistry. — Weinheim: WILEY-VCH, 2007. — 410 p.
 19. **Clawson A. R.** Guide to references on III – V semiconductor chemical etching / *Mater. Sci. Eng. R. Rep.* 2001. Vol. 31. N 1 – 6. P. 1 – 438. DOI: 10.1016/S0927-796X(00)00027-9.
 20. **Ambridge T., Stevenson J., Redstall R.** Applications of Electrochemical Methods for Semiconductor Characterization / *J. Electrochem. Soc.* 1980. Vol. 127. N 1. P. 222 – 228. DOI: 10.1149/1.2129623.
 21. **Amron I.** Errors in Dopant Concentration Profiles Determined by Differential Capacitance Measurements / *Electrochem. Technol.* 1967. Vol. 5. P. 94 – 97.
 22. **Blood P.** Capacitance-Voltage Profiling and the Characterisation of III – V Semiconductors Using Electrolyte Barriers / *Semicond. Sci. Technol.* 1986. Vol. 1. N 1. P. 7 – 27. DOI: 10.1088/0268-1242/1/1/002.
 23. **Facchetti A., Marks T.** Transparent Electronics: From Synthesis to Applications. — Hoboken: John Wiley and Sons, 2010. — 470 p.
 24. **Amosova L. P.** Electrooptical properties and structural features of amorphous ITO / *Fiz. Tekn. Poluprovodn.* 2015. Vol. 49. N 3. P. 426 – 430 [in Russian].
 25. **Tahar R., Ban T., Ohya Y., Takahashi Y.** Tin doped indium oxide thin films: Electrical properties / *J. Appl. Phys.* 1998. Vol. 83. N 5. P. 2631 – 2645. DOI: 10.1063/1.367025.
 26. **Abolmasov S. N., Abramov A. S., Ivanov G. A., et al.** Heterojunction solar cells based on single-crystal silicon with an inkjet-printed contact grid / *Pis'ma Zh. Tekhn. Fiz.* 2017. Vol. 43. N 1. P. 74 – 79 [in Russian].
 27. **Yakovlev G. E., Dorohin M. V., Zubkov V. I., et al.** Specific Features of the Electrochemical Capacitance-Voltage Profiling of GaAs LED and pHEMT Structures with Quantum-Confined Regions / *Fiz. Tekn. Poluprovodn.* 2018. Vol. 52. N 8. P. 873 – 880 [in Russian].
 28. **Yakovlev G. E., Frolov D. S., Zubkova A. V., et al.** Investigation of Ion-Implanted Photosensitive Silicon Structures by Electrochemical Capacitance-Voltage Profiling / *Fiz. Tekn. Poluprovodn.* 2016. Vol. 50. N 3. P. 324 – 330 [in Russian].