

Особенности электрохимического вольт-фарадного профилирования арсенид-галлиевых светоизлучающих и рНЕМТ-структур с квантово-размерными областями

© Г.Е. Яковлев¹, М.В. Дорохин², В.И. Зубков¹, А.Л. Дудин³, А.В. Здравейцев², Е.И. Малышева², Ю.А. Данилов², Б.Н. Звонков², А.В. Кудрин²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

³ Акционерное общество „Светлана-Рост“, 194156 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: geyakovlev@etu.ru

(Получена 21 августа 2017 г. Принята к печати 8 ноября 2017 г.)

Методом электрохимического вольт-фарадного профилирования исследованы квантово-размерные светоизлучающие и транзисторные гетероструктуры на основе GaAs, содержащие области δ -легирования, квантовые ямы InGaAs/GaAs и приповерхностные слои квантовых точек InAs/GaAs. Получены профили распределения концентрации свободных носителей заряда по глубине структур, определены накопленные в квантовой яме и массиве квантовых точек заряды, а также степени легирования эмиттерного и δ -слоев. Проведено моделирование зонной структуры и распределения концентрации носителей заряда по глубине образцов с различной геометрией квантовых ям. Проанализированы особенности электрохимического вольт-фарадного профилирования в гетероструктурах различного типа. Для эффективного разделения откликов от близко расположенных слоев, в частности квантовой ямы и δ -слоя, предложен метод интеграции вольт-фарадных характеристик на каждом этапе травления.

DOI: 10.21883/FTP.2018.08.46212.8708

1. Введение

Несмотря на растущий интерес, поиск и стремление к исследованию и использованию новых полупроводниковых материалов, таких как графен [1,2], полупроводниковый алмаз [3], нитрид бора [4], оксид цинка [5] или поляризационно-легированные широкозонные полупроводники [6,7], наноразмерные гетероструктуры на основе твердых растворов арсенида галлия, в настоящее время занимают главенствующую нишу в ряде областей электроники.

В частности, в спиновой и оптической электронике наибольший интерес вызывают гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ/QW) и самоорганизованными квантовыми точками (КТ) на основе прямозонных полупроводников $A^{III}B^V$. Высокая эффективность излучательной рекомбинации в гетеропарах InGaAs/GaAs позволяет использовать их для создания светоизлучающих приборов. Структуры с КТ InAs/GaAs весьма привлекательны для волоконно-оптических линий связи в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм [8,9] благодаря ряду преимуществ, среди которых высокая температурная стабильность люминесценции, сравнительно высокие время жизни и время сохранения спина носителей заряда.

Другим примером являются полевые транзисторы рНЕМТ (pseudomorphic high-electron-mobility transistor) с двумерным электронным газом высокой плотности на основе псевдоморфно напряженных КЯ AlGaAs/InGaAs/

GaAs, широко применяемые в настоящее время для разработки и создания приборов СВЧ электроники частотного диапазона 4–18 ГГц (усилители, смесители, умножители частоты, управляющие устройства и т.д.) [10–12]. В данном частотном диапазоне отечественные разработки рНЕМТ соответствуют зарубежным и решают проблему недоступности СВЧ приборов для разработчиков и производителей радиоэлектронной аппаратуры.

Электрические, оптические и структурные свойства полупроводниковых приборов в значительной степени определяются уровнем их легирования, типом легирующей примеси и характером ее распределения. Среди ряда методик контроля уровня легирования и пространственного распределения основных носителей заряда (ОНЗ) метод электрохимического вольт-фарадного профилирования (ECV-метод) выделяется широким диапазоном измерения концентрации носителей заряда (от 10^{12} до 10^{21} см⁻³) на глубинах от единиц нм до десятков мкм [13–15]. В основе ECV-метода лежит чередование процессов вольт-фарадных измерений и электрохимического травления, а отличительной чертой является отсутствие необходимости нанесения металлических контактов на образец. Выпрямляющий контакт полупроводник/электролит образует переход, схожий с контактом Шоттки. Метод ECV входит в стандарты международной ассоциации поставщиков полупроводниковой промышленности SEMI и эффективно применяется

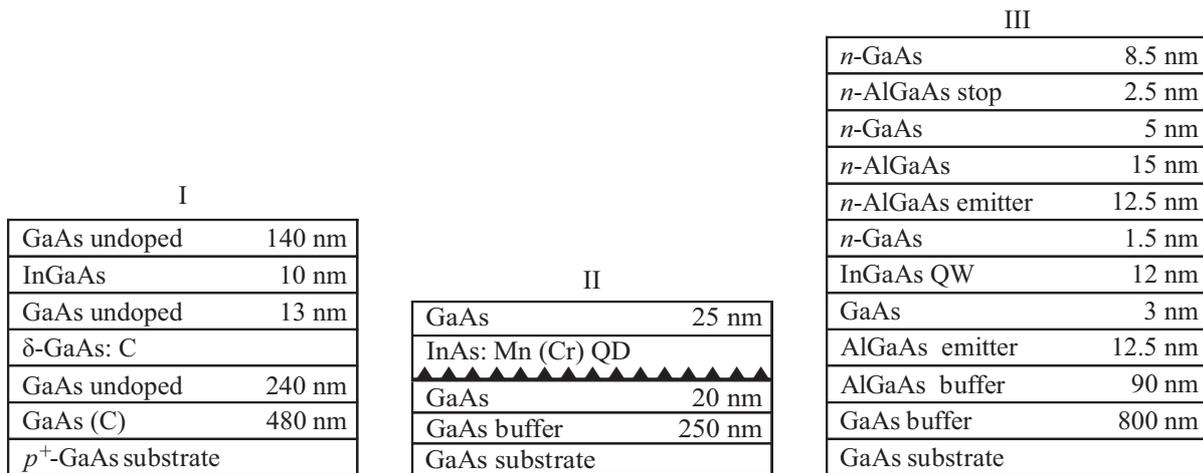


Рис. 1. Схематическое послыное изображение структур трех типов исследуемых образцов.

для исследования различных полупроводниковых структур, в том числе структур с КЯ, КТ и δ -легированными слоями [16,17].

Основной целью настоящей работы являлось изучение особенностей пространственного распределения ОНЗ в гетероструктурах с симметричными (светоизлучающие структуры) и несимметричными (pHEMT-структуры) квантовыми ямами InGaAs одинакового состава, а также анализ особенностей резко неоднородного легирования в гетероструктурах с массивами квантовых точек и δ -слоями, проявляющихся в ECV-измерениях.

2. Образцы и техника эксперимента

В рамках данной работы нами исследовались три типа гетероструктур: светоизлучающие структуры с симметричной КЯ $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ и δ -легированным слоем (тип I), светоизлучающие структуры с массивом самоорганизованных КТ InAs/GaAs (тип II) и pHEMT-структуры с несимметричной КЯ $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ (тип III).

2.1. Светоизлучающие гетероструктуры с квантовыми ямами InGaAs/GaAs

Исследуемые в работе квантово-размерные структуры на основе гетеросистемы InGaAs/GaAs получены методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) на подложках из p^+ -GaAs марки АГЧЦ при температуре ростового процесса 620°C . Схематическое послыное изображение структур исследуемых образцов представлено на рис. 1 (тип I). Образец 1 содержал квантовую яму $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ (толщиной 10 нм) и область δ -легирования, созданную внедрением примеси углерода. В качестве образцов сравнения выступали структуры только с одиночным δ -слоем (образец 2) и только с одиночной квантовой ямой $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (образец 3). Образец 3

выращен на p^+ -подложке с повышенным уровнем легирования и сформирован с толстым (750 нм) верхним нелегированным эпитаксиальным слоем. Более детальное описание данных образцов можно найти в [18].

2.2. Светоизлучающие гетероструктуры с квантовыми точками InAs/GaAs

На гетероструктурах с квантовыми точками InAs/GaAs, выращенных на подложках GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении, исследовались электрические свойства массива КТ в зависимости от степени их легирования примесями. Схематическое изображение образцов представлено на рис. 1 (тип II). Массив самоорганизованных КТ выращивался при температуре 520°C . Пониженная температура, как показали наши предыдущие исследования [8,19,20], обеспечивает формирование массива однородных КТ. Слой квантовых точек зарастивался покровным слоем GaAs толщиной 25 нм. В пару к образцу с сильно легированной подложкой n -типа проводимости (образец 4) был сформирован образец сравнения 5 на полуизолирующей подложке. Легирование КТ для придания им дырочной проводимости осуществлялось в процессе выращивания методом распыления из мишени Mn импульсным Nd:YAG-лазером. Концентрация примеси марганца варьировалась путем изменения интенсивности лазерного излучения в процессе роста [21,22].

2.3. Гетероструктуры pHEMT InGaAs/GaAs/AlGaAs

Серия приборных pHEMT-гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs с двухсторонним легированием (эмиттерный слой) в окрестности квантовой ямы (тип III) была выращена на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Образцы были практически идентичными (рис. 1) и различались только уровнем легирования эмиттерного слоя

n-AlGaAs. В частности, подробно анализируемый далее образец 6 был легирован до уровня $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Квантовая яма In_{0,22}Ga_{0,78}As/GaAs располагалась на глубине (54.5 ± 0.5) нм и имела ширину 12 нм.

2.4. Техника эксперимента

Измерения распределения концентрации основных носителей заряда по глубине гетероструктур проводились при комнатной температуре с использованием установки электрохимического профилирования ECVPro (Nanometrics). В ряде экспериментов для измерения вольт-фарадных характеристик использовался LCR-измеритель Agilent E4980A, который подключался к электрохимической ячейке установки ECVPro через сконструированный блок реле [7]. В качестве электролита для проведения ECV-исследований был выбран водный раствор 0.1 М тайрона. Данный раствор является полирующим травителем для GaAs и обеспечивает прецизионное травление материала с оптимальной скоростью. Площадь электролитического контакта составляла 0.1 см². Частота и амплитуда переменного тестового сигнала выбирались 300 Гц и 100 мВ соответственно. Травление в сильно легированных областях полупроводника проводилось с шагом 1 нм. Контроль глубины травления и качества поверхности осуществлялся при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver NEXT.

3. Экспериментальные данные и обсуждение

3.1. Светоизлучающие структуры с квантовыми ямами InGaAs/GaAs

На рис. 2 представлен полученный ECV-методом профиль концентрации ОНЗ по глубине *x* образца 1, содержащего квантовую яму InGaAs/GaAs и область δ -легирования, созданную внедрением в арсенид галлия примеси углерода. Как видно, ECV-метод позволяет построить зависимость распределения концентрации ОНЗ

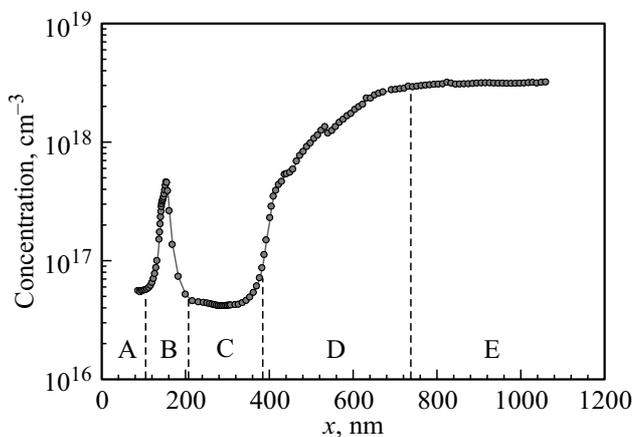


Рис. 2. Профиль распределения концентрации ОНЗ по глубине образца 1.

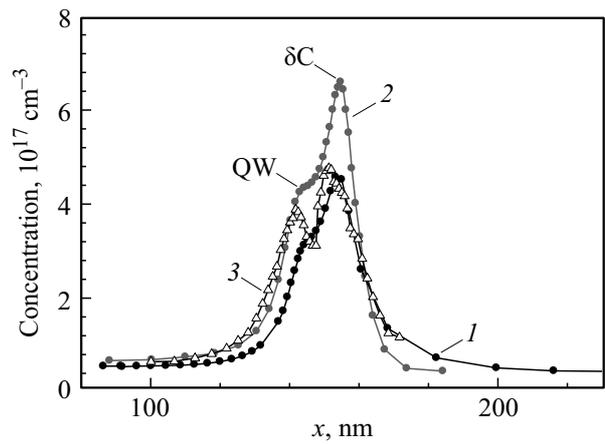


Рис. 3. Профили распределения концентрации ОНЗ вблизи КЯ InGaAs и δ -слоя (δ C) в образце 1: 1 — измерения методом ECV, 2 — измерения методом ВФХ, 3 — суперпозиция ВФХ, измеренных на различных глубинах.

по глубине для всех эпитаксиальных слоев структуры, а также в подложке. На общем распределении концентрации ОНЗ по глубине структуры (см. рис. 2) можно выделить пять участков: участок А вблизи поверхности структуры — область нелегированного покровного слоя GaAs с концентрацией носителей заряда $\sim 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; участок В — суперпозиция двух близко расположенных пиков, соответствующих областям локализации носителей заряда в квантовой яме InGaAs и δ -слою; участок С протяженностью ~ 180 нм — область нелегированного GaAs (спейсера) с концентрацией носителей заряда $\sim 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; участок D протяженностью ~ 400 нм — область буферного слоя GaAs, легированного акцепторной примесью углерода, с концентрацией носителей заряда от $7 \cdot 10^{17}$ до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; участок E — подложка с концентрацией носителей заряда $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Заметим, что найденная концентрация носителей заряда в подложке близка к результатам, полученным измерениями методом эффекта Холла [18].

Подробнее участок В представлен на рис. 3. Вследствие близкого взаимного расположения квантовой ямы и δ -слоя происходит значительное перекрытие соответствующих областей локализации подвижных носителей заряда. Это препятствует разделению двух концентрационных пиков при ECV-профилировании в режиме травления (etching mode) и в измерениях емкости при фиксированном напряжении двухчастотным методом, реализованным в ECV-профилометре. В данной работе, чтобы повысить разрешение, мы реализовали метод, заключающийся в измерениях на каждой глубине травления вольт-фарадных характеристик во всем доступном диапазоне напряжений и получении путем их суперпозиции результирующего профиля концентрации (рис. 3, кривая 3).

Анализируя концентрационные профили, полученные из вольт-фарадных характеристик, измеренных по мере травления слоев полупроводниковой структуры, можно

Характеристики концентрационных профилей измеренных образцов с КЯ

Номер образца	Глубина травления, нм	Накопленный заряд в КЯ, Кл/см ²	Накопленный заряд в δ -слое, Кл/см ²	FWHM концентрационного пика от КЯ/ δ -слоя, нм
1	—	$1 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^{12}$	15/14
2	—	—	$2 \cdot 10^{12}$	26
3	—	$5.5 \cdot 10^{11}$	—	41
6	0	—	—	—
	4	$1 \cdot 10^{12}$	—	16
	7	$1.7 \cdot 10^{12}$	—	12
	16	$2 \cdot 10^{12}$	—	8

заметить следующее. При небольших глубинах травления не удается достигнуть высокого разрешения по концентрации в области, соответствующей глубоко залегающим слоям структуры (области КЯ). Это обусловлено большим значением фактора диссипации из-за преобладания вклада активного сопротивления толстых верхних слоев. Напротив, измерение вольт-фарадных характеристик (ВФХ) после стравливания верхних слоев позволяет создать условия, когда почти вся полная проводимость обусловлена ее реактивной частью. В этом случае малое приращение напряжения ΔU приводит к значительным изменениям емкости ΔC и соответственно к большей чувствительности. Ранее [23] нами для прецизионного измерения ВФХ одиночных КЯ оптимизировались параметры верхнего слоя структур (толщина и концентрация примеси в нем) так, чтобы ВФХ в диапазоне минимальных токов через диод позволила зарегистрировать весь профиль концентрации носителей заряда в области КЯ. В настоящей работе задача решается путем технологического стравливания верхнего слоя до нужной толщины в течение эксперимента. В частности, при измерении образца 1 мы использовали ВФХ от трех областей: верхние слои до КЯ, область квантовой ямы и δ -слоя, нижние слои после δ -слоя. Это позволило уверенно различить близко расположенные пики, связанные с квантовой ямой и δ -слоем [24]. При этом разница между концентрацией в пике отклика от КЯ и концентрацией в области провала между КЯ и δ -слоем составляет 20%, что подтверждает уверенное разделение двух пиков и показывает перспективность предлагаемого метода определения концентрации в случае наличия тонкой структуры в концентрационном профиле.

Для сравнения полученных данных нами были проведены измерения данного образца классическим вольт-фарадным методом с помощью автоматизированного комплекса спектроскопии адмиттанса на базе LCR-метра Agilent E4980A [25]. Результат также представлен на рис. 3 (кривая 2). Для этого на структуру дополнительно были нанесены металлические омический и выпрямляющий (Шоттки) контакты. Как видно из рисунка, ECV-профиль уширен и имеет меньшую амплитуду по сравнению с результатом классических вольт-фарадных измерений. Это может быть объяснено

известной инерционностью режима измерений в случае электролитического контакта. Расчет накопленного заряда в области КЯ и δ -слоя с учетом дебаевского размытия показывает одинаковый результат в пределах погрешности используемых методов.

Верификация результатов проводилась путем самосогласованного моделирования вольт-фарадных характеристик структур с близко расположенными КЯ и δ -слоем по алгоритму, описанному в [14,26]. Кроме отмеченной особенности некоторого уширения ECV-профиля в экспериментальных зависимостях наблюдалось отсутствие областей обеднения ОНЗ, обычно наблюдающихся по обеим сторонам квантовой ямы [26].

На рис. 4 представлены ECV-профили распределения подвижных носителей заряда в образцах 2 и 3, содержащих одиночный δ -слой (кривая 1) и одиночную квантовую яму InGaAs/GaAs (кривая 2) соответственно. Заметим, что в образце 3 с глубоко расположенной КЯ ее профилирование классическим методом ВФХ не представляется возможным ввиду наступления обратного пробоя структуры. Отсутствие провалов на концентрационном профиле в соседних с КЯ областях (кривая 2) мы объясняем особенностями двухчастотного метода измерения в режиме травления нелегированных слоев. Пиковая концентрация ОНЗ в δ -слое равна $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, в КЯ — $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Области минимума концентра-

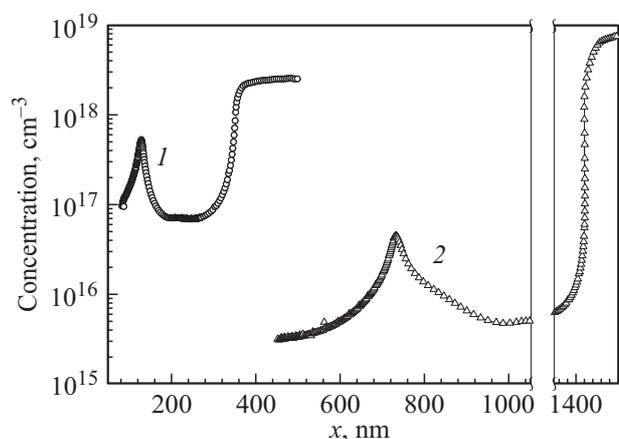


Рис. 4. Профили распределения концентрации ОНЗ по глубине: 1 — образец 2 с δ -слоем, 2 — образец 3 с КЯ.

ции связаны, как обсуждалось ранее, с нелегированным покровным и буферным слоями GaAs. Наличие узкого эпитаксиального слоя с областью δ -легирования приводит к существенному увеличению наблюдаемой концентрации ОНЗ в этих слоях. Далее наблюдается выход на максимальную концентрацию, определяемую буферным слоем и подложкой p -типа проводимости.

Результаты оценки накопленного заряда в КЯ и δ -слое согласно методике, описанной в [27], для образцов 1–3 представлены в таблице. Как и следовало ожидать, величина аккумулируемого в КЯ заряда существенно меньше по сравнению с зарядом, содержащимся в δ -слое.

3.2. Транзисторные рНЕМТ-структуры на основе GaAs

Для сравнительного анализа пространственного распределения ОНЗ в КЯ различной геометрии ECV-методом нами исследовались рНЕМТ-структуры на основе GaAs с несимметричной КЯ InGaAs аналогичного состава. На рис. 5 представлена эволюция концентрационных профилей в зависимости от глубины травления (образец 6), шаг травления 2 нм. Как видно из полученных профилей ОНЗ, в определенном диапазоне глубин травления ($d = 8–20$ нм) удается четко разделить близко расположенные концентрационные пики от эмиттерного слоя и от КЯ.

Концентрационный пик, связанный с эмиттерным слоем (расположен на глубине ~ 38 нм от исходной поверхности, рис. 1), имеет амплитуду $3.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, которая не зависит от глубины травления поверхностного слоя. В противовес этому нами впервые методом ECV обнаружена и проанализирована закономерность, заключающаяся в изменении амплитуды концентрационного пика, связанного с КЯ (см. вставку на рис. 5). Изменение амплитуды вызывается изменением степени заполнения энергетических подзон квантовой ямы носителями заряда по мере стравливания верхних слоев. Данная особенность воспроизводится на различных GaAs-рНЕМТ-структурах. Следует заметить, что данный эффект не наблюдался в светоизлучающих структурах, описанных в разд. 3.1, и является отличительной чертой именно рНЕМТ-структур. Это имеет конкретное практическое значение, поскольку может быть использовано для контролируемого утончения подзатворной области рНЕМТ-структур с целью насыщения КЯ носителями заряда, увеличения проводимости канала и рабочего тока конечного прибора [28]. С этой точки зрения оптимальной величиной утончения верхних слоев для исследуемых рНЕМТ-структур является 16 нм. Заметим, что травление в ECV-эксперименте проводится лишь в малой области диаметром 3 мм, тем самым моделируются условия реальной технологии локального утончения слоев полевого прибора в области затвора.

Важно отметить также, что пик, соответствующий эмиттерному слою, в подобных структурах удается зарегистрировать только методом ECV. В существующих

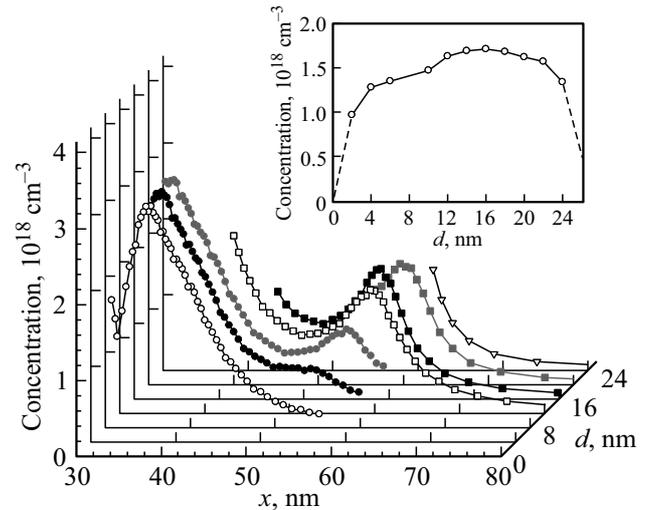


Рис. 5. Эволюция измеренных профилей распределения концентрации ОНЗ образца 6 по мере утончения верхних слоев структуры. На вставке — изменение амплитуды концентрационного пика, связанного с КЯ.

публикациях классическим методом ВФХ наблюдается только один пик на концентрационном профиле рНЕМТ-структур, приписываемый области КЯ (2DEG канала) [29]. Наличие двух пиков в наших измерениях объясняется тем, что жидкий электролит создает на поверхности меньший выпрямляющий барьер по сравнению с металлическим контактом при классическом вольт-фарадном профилировании, поэтому исходная (при $U = 0$) ширина обедненной области оказывается меньше [30].

В таблице также представлена информация об уровне заполнения носителями заряда квантовой ямы в зависимости от глубины травления образца 6. Анализ показывает, что профили распределения концентрации ОНЗ уширены на величину дебаевского размытия, при этом полученные результаты хорошо коррелируют с паспортными данными выращенной структуры, а имеющееся незначительное несовпадение по координате (< 5 нм) может быть связано с особенностью профилирования несимметричной КЯ методом ECV [31]. Как и ожидалось для рНЕМТ-структур, накопленный в КЯ заряд, в зависимости от величины утончения подзатворных слоев до 2 раз больше по сравнению со светоизлучающими структурами. Очевидно, больший накапливаемый заряд при схожем по порядку уровне легирования смежных с КЯ областей объясняется большим разрывом зон на гетерогранице AlGaAs/InGaAs и несимметричной геометрией КЯ.

Для анализа электронной структуры КЯ нами были проведены измерения фотолюминесценции (ФЛ) при различных температурах и их численное моделирование [32]. В измеренных спектрах ФЛ наблюдались два пика различной интенсивности в области длины волны 1000 нм. Эти пики формируются вследствие рекомбинации электронов из первой и второй подзон размерного

квантования зоны проводимости КЯ с дырками валентной зоны. Сопоставление расчетных и наблюдаемых спектров ФЛ также показало, что в ходе эпитаксиального роста удалось избежать сегрегации как индия, так и кремния, а также вызываемых ими искажений формы квантовой ямы [30].

3.3. Светоизлучающие структуры с квантовыми точками InAs/GaAs

В третьей части работы анализировались особенности заполнения квантовых точек носителями заряда в зависимости от легирующей примеси. Результаты исследования образцов светоизлучающих гетероструктур с массивом самоорганизованных КТ InAs/GaAs, сформированных на глубине 25 нм от поверхности, представлены на рис. 6. На обоих профилях на соответствующем расстоянии от поверхности наблюдаются максимумы концентрации дырок. Как правило, в вольт-фарадных измерениях положение измеренного концентрационного отклика от КТ сдвинуто в глубь структуры относительно его реального положения из-за наличия так называемого λ -слоя [14]. В нашем случае высоколегированной структуры толщина λ -слоя, в соответствии с соображениями [14], оказывается малой, так что укладывается в погрешность измерений и технологического разброса параметров структур.

В случае структуры без дополнительного акцепторного легирования слоя КТ (образец 4) концентрация дырок в максимуме составляет $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (кривая 1). Такая достаточно высокая концентрация ОНЗ в приповерхностной области обусловлена большой величиной разрыва зон в слое квантовых точек и высокой степенью пространственного ограничения носителей заряда. Введение марганца в область квантовых точек (образец 5) приводит к дополнительному увеличению общей концентрации дырок почти на порядок величины. Поверхностная плотность атомов Mn, согласно технологическим параметрам роста, задавалась на уровне $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что соответствует объемной концентрации $\sim 2.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эта величина хорошо согласуется с измеренным значением концентрации $1.5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и свидетельствует о том, что большая часть примеси встроилась в узлы кристаллической решетки. Данная информация является очень полезной для прогнозирования свойств реальных приборов оптоэлектроники, так как существует определенная вероятность встраивания марганца в междоузлия, где он в таком случае является двойным донором. Высокая степень локализации носителей заряда в КТ также подтверждается спектрами ФЛ, измеренными при комнатной температуре. В спектре наблюдается широкая полоса с максимумом при энергии квантов $\sim 0.97 \text{ эВ}$, соответствующая излучательным переходам в КТ InAs.

В образце 4 по мере удаления от поверхности (область 100–350 нм) наблюдается снижение концентрации дырок до $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, однако при этом тип проводи-

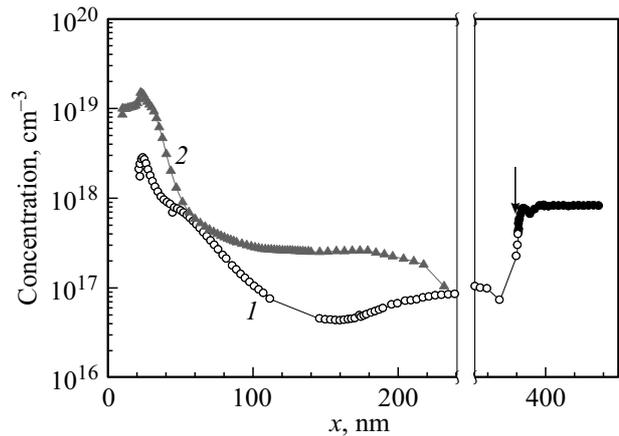


Рис. 6. Профили распределения концентрации носителей заряда по глубине образцов с квантовыми точками: 1 — образец 4, 2 — образец 5.

мости не изменяется. Таким образом, измерения выявляют проводимость p -типа в номинально легированном донорной примесью буферном слое. По-видимому, причиной разногласий в технологических и измеряемых параметрах является наличие фоновой примеси акцепторного типа в реакторе. В результате этого в процессе роста имели место перекомпенсация и изменение типа проводимости. На расстоянии $\sim 350 \text{ нм}$ от поверхности происходит смена типа проводимости на электронную и увеличение концентрации до $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Смена типа проводимости на кривой 1 отмечена стрелкой. Расстояние, на котором происходит смена типа проводимости, примерно соответствует глубине буферного и покровного слоев, выращенных на подложке n -GaAs. Таким образом, можно предположить, что измеренная концентрация электронов на глубине 400 нм соответствует их концентрации в подложке GaAs. Заметим, что возможность измерения концентрации разноименных типов носителей заряда в рамках одного эксперимента недоступна в классическом вольт-фарадном профилировании и является отличительной особенностью метода ECV. Это становится возможным за счет операции травления, когда перманентно происходит изменение граничных условий на поверхности структуры, и при проходе через p - n -переход мы наблюдаем смену наклона ВФХ [16].

Аналогично предыдущей структуре в образце 5 по мере удаления от поверхности наблюдается спад концентрации ОНЗ. В области 50–250 нм, соответствующей буферному слою GaAs, была получена концентрация дырок $p = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшее снижение концентрации свободных носителей свидетельствует об измерении концентрации в полуизолирующей подложке GaAs.

Для анализа условий применимости ECV-метода в случае полуизолирующих структур с компенсирующей примесью нами также измерялись образцы с квантовыми точками InAs, легированными Cr. Известно, что в отличие от марганца введение глубокой примеси хрома вызывает кардинальное снижение концентрации

свободных носителей заряда [33]. Соответственно это приводит к увеличению толщины обедненного слоя и резкому уменьшению емкости структуры практически до пределов ее возможной регистрации существующими измерителями емкости. Применение метода ECV на границе разрешающей способности позволило сделать оценку концентрации ОНЗ в структурах, легированных хромом, — ее значение лежит ниже 10^{12} см⁻³.

4. Заключение

В ходе выполнения работы методом электрохимического вольт-фарадного профилирования исследовались квантово-размерные светоизлучающие и транзисторные гетероструктуры на основе GaAs, содержащие δ -слои, квантовые ямы AlGaAs/InGaAs/GaAs и приповерхностные квантовые точки InAs/GaAs. Показана эффективность ECV-метода для нахождения детального распределения концентрации основных носителей заряда и толщины слоев в гетероструктурах с КЯ и КТ.

Получены зависимости распределения концентрации носителей заряда по глубине структур, определены положение и степень легирования КЯ, массива КТ, эмиттерных и δ -слоев. Для уверенного разделения близко расположенных пиков, связанных с квантовой ямой и δ -слоем или квантовой ямой и эмиттерным слоем, предложен метод интегрирования вольт-фарадных характеристик на каждом этапе травления с последующим пересчетом в результирующий профиль распределения ОНЗ.

Впервые методом ECV обнаружена зависимость степени заполнения носителями заряда КЯ в рНЕМТ-структурах от глубины травления. Данная особенность может быть использована для контролируемого утончения подзатворной области рНЕМТ-структур с целью насыщения КЯ носителями заряда, увеличения проводимости канала и рабочего тока конечного прибора. Для рассмотренных рНЕМТ-структур оптимальной глубиной утончения поверхностных слоев является 16 нм. Сравнением накопленного заряда в КЯ светозлучающих и рНЕМТ-структур, установлено, что у последних, в зависимости от величины утончения подзатворного слоя, это значение может быть до 2 раз больше.

В образцах с КТ InAs/GaAs EVC-методом обнаружена проводимость p -типа в области номинально не легированного (образец 5) и легированного донорной примесью (образец 4) буферных слоев. Мы связываем это с присутствием фоновой примеси в реакторе, перекompенсацией основной легирующей примеси и результирующим изменением типа проводимости структуры.

Для образцов КТ InAs/GaAs с компенсирующей примесью хрома получена оценка минимального уровня легирования структур, который возможно зарегистрировать с помощью ECV-метода.

Коллектив авторов выражает особую благодарность канд. физ.-мат. наук Д.С. Фролову (Elmos Semiconductor AG) за помощь в измерениях и ценные консультации при написании данной статьи.

Работа выполнена в рамках реализации проекта № 8.1751.2017/ПЧ Министерство образования и науки России, соглашения № 14.582.21.0010 Министерство образования и науки России (идентификатор проекта RFMEFI58215X0010), при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-07824_a, 16-07-01102_a), гранта президента Российской Федерации (МК-8221.2016.2), а также при финансовой поддержке СПбГЭТУ „ЛЭТИ“ (мероприятие М.5.1.2).

Список литературы

- [1] A.K. Geim, K.S. Novoselov. *Nature Materials*, **6**, 183 (2007).
- [2] A.K. Geim. *Science*, **324**, 1530 (2009).
- [3] V.I. Zubkov, O.V. Kucheroва, A.V. Zubkova, J.E. Butler, V.A. Ilyin, A.V. Afanas'ev, S.A. Bogdanov, A.L. Vikharev. *J. Appl. Phys.*, **118**, 145703 (2015).
- [4] G. Cassaboіs, P. Valvin, B. Gil. *Nature Photonics*, **10**, 262 (2016).
- [5] B.K. Meyer, H. Alves, D.M. Hofmann, W. Kriegseis, D. Forster, F. Bertram, J. Christen, A. Hoffmann, M. Straßburg, M. Dworzak, U. Haboeck, A.V. Rodina. *Phys. Status Solidi B*, **241**, 231 (2004).
- [6] Н.В. Кузнецова, Д.В. Нечаев, Н.М. Шмидт, С.Ю. Карпов, Н.В. Ржеуцкий, В.Е. Земляков, В.Х. Кайбышев, Д.Ю. Казанцев, С.И. Трошков, В.И. Егоркин, Б.Я. Бер, Е.В. Луценко, С.В. Иванов, В.Н. Жмерик. *Письма в ЖТФ*, **42**, 57 (2016).
- [7] D.S. Frolov, V.I. Zubkov. *Semicond. Sci. Technol.*, **31**, 125013 (2016).
- [8] I.A. Karpovich, B.N. Zvonkov, N.V. Baidus, S.V. Tikhov, D.O. Filatov. *Trends in nanotechnology research* (N. Y., Nova Science Publishers, 2004).
- [9] J.L. Primus, K-H. Choi, A. Trampert, A.M. Yakunin, J. Ferre, J.H. Wolter, W. Van Roy, J. De Boeck. *J. Cryst. Growth*, **280**, 32 (2005).
- [10] T. Mimura. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 8263 (2005).
- [11] M. Golio, J. Golio. *RF and Microwave Passive and Active Technologies* (Boca Raton, CRC Press, 2007).
- [12] M.M. Pejovic, Milic M. Pejovic. *Different Types of Field-Effect Transistors — Theory and Applications* (Rijeka, InTech, 2017).
- [13] T. Ambridge, M. Faktor. *J. Appl. Electrochem.*, **5**, 319 (1975).
- [14] В.И. Зубков. *Диагностика полупроводниковых наногетероструктур методами спектроскопии адмиттанса* (СПб., Элмор, 2007).
- [15] 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*, **50**, 324 (2016).
- [16] V. Zubkov, O. Kucheroва, D. Frolov, A. Zubkova. *Phys. Status Solidi C*, **10**, 342 (2013).
- [17] Д.С. Фролов, Г.Е. Яковлев, В.И. Зубков, А.Л. Дудин, А.В. Соломникова, Е.С. Кунашик. *Изв. СПбГЭТУ „ЛЭТИ“*, **2**, 6 (2016).
- [18] М.В. Дорохин, П.Б. Демина, Н.В. Байдусь, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, М.М. Прокофьева. *Поверхность, Рентген., синхр. нейтр. исслед.*, № 5, 34 (2010).
- [19] М.В. Дорохин, А.В. Здоровейцев, Е.И. Малышева, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.Е. Шолина. *Поверхность, Рентген., синхр. нейтр. исслед.*, № 6, 55 (2012).

- [20] М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, А.В. Рыков, А.В. Здоровейцев, Е.И. Малышева, Ю.А. Данилов, В.И. Зубков, Д.С. Фролов, Г.Е. Яковлев, А.В. Кудрин. *ЖТФ*, **87**, 1539 (2017).
- [21] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. *Оптич. журн.*, **75**, 56 (2008).
- [22] I.A. Karpovich, N.V. Baidus', B.N. Zvonkov, S.V. Morozov, D.O. Filatov, A.V. Zdoroveishev. *Nanotechnology*, **12**, 425 (2001).
- [23] V.I. Zubkov, M.A. Melnik, A.V. Solomonov, E.O. Tsvelev, F. Bugge, M. Weyers, G. Tränkle. *Phys. Rev. B*, **70**, 075312 (2004).
- [24] G. Yakovlev, D. Frolov, V. Zubkov. *J. Phys. Conf. Ser.*, **690**, 012015 (2016).
- [25] В.И. Зубков. *ФТП*, **41**, 331 (2007).
- [26] В.И. Зубков, И.Н. Яковлев, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин, О.В. Кучерова, В.Н. Черкасова. *ФТП*, **48**, 944 (2014).
- [27] А.Н. Петровская, В.И. Зубков. *ФТП*, **43**, 1368 (2009).
- [28] Э.Ю. Козловский. Автореф. канд. дис. (Великий Новгород, НовГУ, 2013).
- [29] 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. Завапин, Г.В. Медведев. *ФТП*, **50**, 1599 (2016).
- [30] А.Л. Дудин, М.С. Миронова, Г.Е. Яковлев, Д.С. Фролов, И.В. Коган, И.В. Шуков, В.И. Зубков, Г.Ф. Глинский. *Прикл. физика*, **3**, 78 (2017).
- [31] И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.Г. Мокиров, С.С. Широков, Р.М. Имамов, И.А. Субботин. *ФТП*, **42**, 1102 (2008).
- [32] M.S. Mironova, V.I. Zubkov, A.L. Dudin, G.F. Glinskii. *Proc. 25th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology* (St. Petersburg, Russia, 2017) p. 118.
- [33] R. Zucca. *J. Appl. Phys.*, **48**, 1987 (1977).

Редактор Л.В. Шаронова

The features of electrochemical capacitance–voltage profiling of GaAs-based LED and pHEMT structures with quantum-confined regions

G.E. Yakovlev¹, M.V. Dorokhin², V.I. Zubkov¹, A.L. Dudin³, A.V. Zdoroveyshchev², E.I. Malysheva², Yu.A. Danilov², B.N. Zvonkov², A.V. Kudrin²

¹ St. Petersburg State Electrotechnical University „LETI“, 197376 St. Petersburg, Russia

² Physical-Technical Research Institute of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

³ JCS „Svetlana-Rost“, 194156 St. Petersburg, Russia

Abstract The GaAs-based light-emitting and HEMT-structures with δ -doping regions, InGaAs/GaAs quantum wells and near-surface InAs/GaAs quantum dots were studied by means of electrochemical capacitance–voltage profiling technique. The profiles of free charge carrier depth distribution have been obtained, the accumulated in quantum wells and quantum dots space charge and doping level in emitter and δ -layers have been determined. The line-up potential and free carrier density distribution along the depth of the samples with different quantum well geometry are simulated. The features of electrochemical capacitance–voltage profiling in case of different type structures are analyzed. For effective separation of responses from close-located layers, in particular a quantum well and a δ -layer, the integrating technique of capacitance–voltage characteristics at each etching step is proposed.